

GREEN DEAL

SCIENCE.RESEARCH.PANNONIA.
Fachhochschule Burgenland
Band 26

e.nova

INTERNATIONAL CONFERENCE


Green Deal

Energie – Gebäude – Umwelt

2021/22

BAND 25

gefördert durch:
Bundesministerium für
Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

klimaaktiv


 **STADT**
der Zukunft

Holzhausen

Herausgegeben von: Hildegard Gremmel-Simon
Department Energie & Umwelt
Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld
Fachhochschule Burgenland GmbH
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld, Österreich
www.fh-burgenland.at

Organisationskomitee: Johann Binder
Ernst Blümel
Christian Heschl
Gernot Hanreich
Marcus Keding
Robert Kranner
Richard Krottl
Markus Puchegger
Werner Stutterecker
Christian Wartha

Eigentümer und Verleger
Verlag Holzhausen GmbH, Traungasse 14-16, 1030 Wien, Österreich
Verlagsleitung: DDr. Gabriele Ambros
Verlagsort: Wien – Herstellungsort: Wien – Printed in Austria
1. Auflage 2021
ISBN: 978-3-903207-64-6
Copyright © Verlag Holzhausen GmbH, 2021

Bibliografische Informationen der Österreichischen Nationalbibliothek und der Deutschen Nationalbibliothek:

Die ÖNB und die DNB verzeichnen diese Publikation in den Nationalbibliografien; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar. Für die Österreichische Bibliothek: <http://onb.ac.at>, für die Deutsche Bibliothek: <http://dnb.ddb.de>

Lizenzgeber: Creative Commons (CC) BY 4.0

Sofern vom Verlag nicht anders verlautbart, wird der Text dieser Werkfassung bis auf Weiteres unter der Lizenz »Creative Commons (CC) BY 4.0« zur Verfügung gestellt. Nähere Informationen zu dem Umfang dieser Lizenz sind unter <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> abrufbar.

www.verlagholzhausen.at

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. (FH) Dipl.-Ing. Dr. Gernot Hanreich (Vorsitz)
Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie & Umwelt, Österreich

Prof. (FH) Dipl.-Ing. Ernst Blümel
Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie & Umwelt, Österreich

Mag. Hildegund Figl
IBO-Österr. Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Österreich

Dipl.-Ing. Dr. Helmuth Kreiner
TU Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Österreich

Hon.-Prof. (FH) Dipl.-Ing. Dr. mont. Arne Ragoßnig MSc. (OU)
RM Umweltkonsulten ZT GmbH, Österreich

Prof. (FH) Regina Rowland BA, MGD, PhD
Fachhochschule Burgenland GmbH, Departments Wirtschaft und Energie & Umwelt

Dipl.-Ing. Susanne Supper
Green Energy Lab, Cluster Manager, Österreich

Dr. Günter Wind
TB Wind, Ingenieurbüro für Physik, Präsident des Vereins pansol, Österreich

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Winter
TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik u. Techn. Biowissenschaften, Österreich

Vorwort

Und wieder kein Jahr wie jedes andere! Nach wie vor erfordert die Corona-Pandemie besondere Maßnahmen zum Schutz der Menschen.

Im Jahr 2020 fand die e-nova inmitten eines Lockdowns als Online-Konferenz statt. Auch der für das Jahr 2021 ursprünglich vorgesehene Termin wäre in den Zeitraum eines weiteren notwendigen Lockdowns gefallen. Um jedoch wieder eine Präsenzveranstaltung zu ermöglichen, haben wir uns für eine terminliche Verschiebung entschieden. Der persönliche Kontakt und Austausch sollen wieder ein wertvoller Bestandteil der heurigen Konferenz sein.

Die Corona-Krise hat im Vorjahr viele Themen, wie auch Klimawandel und Klimaschutz, medial überschattet. Nicht zuletzt die zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Vorwortes laufende UN-Klimakonferenz 2021 (COP 26) rückt jedoch die notwendigen Bestrebungen zur Eindämmung der gegenwärtigen globalen Erwärmung wieder in den Vordergrund. Betrachtet man das Ausmaß der Auswirkungen, welche die einschneidenden Corona-bedingten Maßnahmen wie Lockdowns, Wirtschafts- und Reisebeschränkungen auf den CO₂-Ausstoß mit sich brachten, so erkennt man, welche Mammutaufgabe hier noch bevorsteht. Und damit wird es nicht getan sein, Ressourcenschonung und Naturschutz sind weitere überlebenswichtige Aufgaben und mit dem Klimaschutz gegebenenfalls in Einklang zu bringen.

Entsprechend der sich darstellenden Komplexität widmet sich die e-nova 2021 auch heuer wieder dieser Thematik in der gewohnten Breite und Tiefe mit themenspezifischen Vortragsblöcken.

Green Deal: Energie – Gebäude – Umwelt ist der Titel der diesjährigen Konferenz. Als internationale wissenschaftliche Konferenz konzipiert, bietet die e-nova sowohl der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch berufsfeld-orientierten Fachleuten die Möglichkeit zur Diskussion und zum Austausch.

Auch die Fachhochschule Burgenland selbst hat im vergangenen Jahr weitere Anstrengungen unternommen, um aktiv Maßnahmen im Bereich Nachhaltigkeit und Umweltschutz zu setzen. Gemeinsam mit zehn weiteren österreichischen Fachhochschulen wurde das „Bündnis Nachhaltige Hochschulen“ geschlossen. Stellvertretende Obfrau ist die Nachhaltigkeitsbeauftragte der FH Burgenland. Mit dem „LowErgetikum“ ist ein weiteres Demonstrations- und Versuchsgebäude am Standort Pinkafeld in Fertigstellung. Diese Einrichtung ermöglicht die integrale und interdisziplinäre Untersuchung von Low-Tech-Ansätzen im Gebäudebereich. In unmittelbarer Nachbarschaft zum bereits bestehenden Energetikum schafft es die einzigartige Möglichkeit, unterschiedlicher Ansätze und Strategien unter Realbedingungen auch vergleichend zu untersuchen.

Auch das Studienprogramm im Department Energie & Umwelt konnte weiter ausgebaut werden. Mit Oktober 2021 nahm der Bachelorstudiengang Angewandte Elektronik und Photonik seinen Betrieb auf und komplettiert das Ausbildungsprogramm am Standort Pinkafeld.

Gernot Hanreich
Rektor

Foreword

And again, not a year like any other! The Corona pandemic still requires special protective measures.

In 2020, e-nova was held online in the middle of a lockdown. As initially planned, also e-nova 2021 would have fallen into the period of another necessary lockdown. However, in order to make a face-to-face event possible, we decided to postpone the congress to June 2022, thus ensuring that personal contact and exchange play a vital role in the conference again.

The Corona crisis overshadowed most news stories in the media last year, including climate change and climate protection. The UN Climate Change Conference 2021 (COP 26), though, which is taking place at the time of writing this foreword, is bringing the necessary efforts to curb current global warming back to the fore. If one considers the extent of the impact that the drastic Corona-related measures such as lockdowns, economic and travel restrictions have had on CO₂ emissions, one realises what a mammoth task still lies ahead. And that will not be the end of it; resource conservation and nature protection are further tasks that are vital for survival and must be reconciled with climate protection if necessary.

In line with the complexity of this issue, this year's e-nova will once again be devoted to this topic in the usual breadth and depth with topic-specific lecture blocks.

Green Deal: Energy – Buildings – Environment is the title of e-nova2021/22. Conceived as an international scientific conference, e-nova offers the scientific community as well as professionally oriented experts the opportunity for discussion and exchange.

The University of Applied Sciences Burgenland itself has also made further efforts with regard to sustainability and environmental protection. Together with ten other Austrian universities of applied sciences, the "Alliance of Sustainable Universities" was formed. The deputy chairperson is the sustainability officer of the UAS Burgenland. Furthermore, the "LowErgetikum", another demonstration and test building, is currently being built at the Pinkafeld campus. This facility enables the integral and interdisciplinary investigation of low-tech approaches in the building sector. In the immediate vicinity of the already completed Energetikum, it creates the unique opportunity for the comparative investigation of different approaches and strategies under real conditions.

Finally, the study programme in the Department of Energy & Environment was further expanded. In October 2021, the bachelor's degree programme in Applied Electronics and Photonics was launched, completing the training programme at the Pinkafeld campus.

Gernot Hanreich

Rektor



Für Lebensräume mit Zukunft.



CV-CONSULTING
www.gesundbauen.at



Inhaltsverzeichnis

SESSION 2A: PROZESSMODELLIERUNG – EFFIZIENZSTEIGERUNG

Improved ORC Process for Power Production by using Low Temperature Heat	
Krail / FH Burgenland GmbH / AT	
Beckmann / Technical Office Beckmann / AT	
Schittl / Forschung Burgenland GmbH / AT	19
Brennwertnutzung bei der Holzverbrennung	
Floss, Hilbe / Hochschule Biberach / DE	31
Datengetriebene Modellierung einer Zweibettwirbelschicht-Gaserzeugungsanlage	
Stanger, Kozek, Schirrer / TU Wien / AT	41

SESSION 3A: GREEN ENERGY LAB – SEKTORKOPPLUNG

Modellierungstool für den Einsatz von Warmwasserspeichern als Flexibilitäten	
Gnam / FH Burgenland GmbH / AT	
Schindler, Jasek, Pfeiffer, Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT	51
Low-Cost-Technologien zur Einbindung kleiner el. Wärmespeicher in VKs	
Rabensteiner / 4ward Energy Research GmbH / AT	59
Erneuerbar Heizen und Kühlen mit „Energie aus Abwasser“ am Beispiel Zentrale Wien Kanal	
Wiedemann / Rabmer GreenTech GmbH / AT	
Gennari / Fachhochschule Oberösterreich / AT	
Koller / Rabmer Bau & Umwelttechnik GmbH / AT	63
Innovatives Modernisierungskonzept zur Effizienzsteigerung im Biomasse-Heizwerk Saalfelden	
Bärnthaler, Theissing / FH-Joanneum / AT	
Herbst, Seifert / Salzburg AG / AT	
Kelz / AEE INTEC / AT	71

SESSION 4A: GREEN ENERGY LAB – AKZEPTANZ UND IMPACT

Visualisierung von Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung – eine Untersuchung zum Verständnis von Energiedaten	
Pfeiffer, Stolavetz, Maier / Forschung Burgenland GmbH / AT	79
Individuelle Emotionen als Unterstützung zur Visualisierung des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte	
Kremsner, Pfeiffer, Marhold, Maier / Forschung Burgenland GmbH / AT	87
Ungleich verteilte Chancen der Energiewende – Herausforderungen in der Energieforschung	
Ettwein, Werner / FH Technikum Wien / AT	97

SESSION 5A: WÄRME- & KÄLTENETZE

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung: Moderne Technologie allein ist kein Garant für hohe Effizienz

Moderau, Floss / Hochschule Biberach / DE 105

Application of High-Efficiency and Renewable Energy Sources in a DH System

Mudrá, Takács / Slovak University of Technology in Bratislava / SK 113

SESSION 6A: H2 – GREEN ENERGY SOURCE OF THE FUTURE FOR AUSTRIA AND SLOVENIA?

Innovative pathways to low-carbon society

Likozar / National Institute of Chemistry / SL 123

Inspiring and preparing the next generation for green energy – an educational concept

Warmuth / Fachhochschule Kärnten / AT 127

R&D on lifetime of hydrogen fuel cells

Bodner, Heidingger, Roschger, Wolf, Malli, Hacker / TU Graz / AT 129

Integrated Hydrogen Energy Systems

Heschl / FH Burgenland GmbH / AT
Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT 133

SESSION 7A: TECHFM4.0

Predictive Maintenance für Baukonstruktionen

Veitsberger, Markl / normsonsult ZT GmbH / AT 139

IT-Security in der Gebäudetechnik

Waringer / Sauter Mess- und Regeltechnik GmbH / AT 147

Visible Light Positioning im smarten Gebäude – Lösungsansätze und Herausforderungen

Weiss, Fragner, Wenzl / JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mbH / AT 155

SESSION 2B: WÄRMEPUMPENSYSTEME

Effizienzsteigerung von Wärmepumpen durch geschickte Speicher-Einbindung

Floss, Fürst / Hochschule Biberach / DE 163

Thermoelektrische Lüftungswärmepumpe – theoretisches und praktisches Potenzial

Hagenkamp, Blanke, Döring / FH Aachen – University of Applied Sciences / DE 173

SESSION 3B: DIGITALES PLANEN

Green BIM. Kriterien und Parameter, um Bauwerksbegrünung in das BIM-Modell zu bringen

Knoll, Renkin / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT
Kräftner / Kräftner Landschaftsarchitektur / AT
Dopheide / Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U. / AT
Murschetz / TU Graz / AT 181

Informationsintegration von BIM Daten mit BES und CFD Simulationen

Gursch, Schlager, Kern / Know-Center GmbH / AT	
Pramhas / Thomas Lorenz ZT GmbH / AT	
Knopper / IKK Engineering GmbH / AT	
Brandl / TU Graz / AT	
Gratzl / FH Salzburg / AT	187

Beitrag der BIM-Methodik zur CO₂-Reduktion – eine Potentialanalyse

Müller-Thiede, Königshofer / M.O.O.CON GmbH / AT	
Deutschmann / Heid und Partner Rechtsanwälte GmbH / AT	
Warzecha / Mensch und Maschine Austria GmbH / AT	195

SESSION 4B: STÄDTISCHE ÜBERHITZUNG**Lowtech Bürogebäude – Wesentliche Beeinflussungsgrößen**

Lorber / ALLPLAN GmbH / AT	
Hengel / AEE INTEC / AT	205

Cool-down Güssing – innovative Ansätze zur passiven Kühlung von Bestandsgebäuden

Tomaschitz, Stöller / Forschung Burgenland GmbH / AT	
Doczekal / Güssing Energy Technologies GmbH / AT	
Pratter / 4ward Energy Research GmbH / AT	215

Tröpfelbad 2.0: Mikroklimatische und soziale Monitoring-Ergebnisse von zwei Coolspots in Wien

Knoll, Renkin / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT	
Schnepf, Vollmann / Green4Cities GmbH / AT	223

SESSION 5B: QUARTIERE DER ZUNKUNFT**PLUS-ENERGIE MELK: Erfahrungen bei der Sondierung von Plus-Energie-Arealen**

Grim-Schlink, Hofer, Stipsits / e7 energy innovation & engineering / AT	235
---	-----

SESSION 6B: ENERGIEKONZEPTE – FASSADEN**Reaching PEB with renovated building using Multi-functional façades**

Hengel, Gumhalter, Ramschak / AEE INTEC / AT	243
--	-----

Sanierung von Geschoßwohnbauten mit thermisch aktivierten Fassaden – Bestimmung des Flexibilitätspotentials

Gumhalter, Hengel, Ramschak / AEE INTEC / AT	255
--	-----

Energy²POG: Eine grüne Oase am Pogusch

Höfler, Weiß, Hengel, Wagner / AEE INTEC / AT	
Reitbauer / Steirereck GmbH / AT	
Pichler / TBH GmbH / AT	265

SESSION 7B: SURFACE HEATING AND COOLING SYSTEMS

Designing radiant systems for building retrofit

Junasová, Krajčik, Šimko / Slovak University of Technology / SK
 Šikula / Brno University of Technology / CZ

275

SESSION 2C: KLIMAAKTIV

Entsorgung und Kreislauffähigkeit von Gebäuden in klimaaktiv

Leindecker / FH OÖ StudienbetriebsGmbH / AT
 Bohrer / FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH / AT

285

Green Deal – Bauprodukte am Weg in die Circular Economy am Beispiel der Gebäudezertifizierung klimaaktiv

Bauer, Figl, Scharnhorst / IBO / AT

293

SESSION 3C: RECHTLICHES UND REGULATORISCHES UMFELD

Demand Side Management – Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen

Kuhlmann, Seeber / FH Burgenland GmbH / AT

301

Transforming product efficiency policy into system efficiency policy

Díaz / ECODESIGN company GmbH / AT
 Siderius / Netherlands Enterprise Agency / NL
 Brüniger / Swiss Federal Office of Energy / CH

307

Die Digitalisierung des Energieaudits

Hofer, Rammerstorfer, Stipsits / e7 energy innovation & engineering / AT

315

SESSION 4C: INTELLIGENT SENSING AND CONTROL

PyroScanner – efficient measurement of solar transmission of windows and complex fenestration systems relying on a moving pyranometer

Rüdisser, Pertschy, Wagner / AEE INTEC / AT

325

Model Predictive Control for Mobile Refrigeration Systems: Challenges and Approaches

Fallmann, Poks, Kozek / TU Wien / AT

335

SESSION 5C: EFFIZIENZ UND KOMFORT

Strategien zur Vermeidung von Viren und Feinstäuben in der Raumluft

Braunegg / ConsultAIR GmbH / AT

345

Energieeffizienz und Behaglichkeit in sanierten Bildungsbauten

Kendlbacher, Koch / IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH / AT

353

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

Rabensteiner / 4ward Energy Research GmbH / AT
 Jasek / Forschung Burgenland GmbH / AT

361

SESSION 6C: LIFE CYCLE THINKING

A “life cycle thinking” approach to assess differences in the energy use of SiC vs. Si power semiconductors

- Díaz / ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH / AT
 Schmidt, Glaser / TU Wien / AT
 Makoschitz / AIT / AT 369

Environmental Assessment of Ecodesign Measures for Silicon Based Photovoltaic Modules

- Dobra / Montanuniversität Leoben / AT
 Oreski / PCCL – Polymer Competence Center Leoben GmbH / AT
 Figl / IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH / AT 375

“Knowledge sharing & Organizational Learning shape SMEs’ attitudes towards a circular economy”

- Baldwin / FH Burgenland GmbH / AT 383

SESSION 7C: URBANES REGENWASSERMANAGEMENT

Dezentrales Regenwassermanagement mit ökologischen Nebenwirkungen

- Schreiber / Zenebio GmbH / AT 393

POSTER

Fresh air in the school classrooms

- Štefanič, Straková / TU Bratislava / SK 401

Interaktive Webanwendung für nachhaltiges, grün-blaues Regenwassermanagement

- Minixhofer, Weiss, Stangl / BOKU / AT
 Berger / Green4Cities GmbH / AT
 Szeliga / DIE ANTWORT – Büro für Informationstechnik GmbH / AT 409

Das Gründach – das bessere Flachdach. Der Beitrag von Gründächern zur Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren

- Vondrus / CV-Consulting e.U. / AT
 Erker / Slavonia Baubedarf GmbH / AT
 Stefenelli / Stauss Perlite GmbH / AT 417

Design optimization of a heat distribution during the reconstruction of the DH networks

- Švarcová, Petráš / TU Bratislava / SK
 Štefanec / NRG flex s.r.o / SK 425

Partizipative und nachhaltige Entwicklung eines Regelwohnbaus

- Höfler, Fulterer / AEE INTEC / AT
 Brown, Schwarz, Platzer / schwarz.platzer architekten / AT
 Überbacher, Jankovic / WEGRAZ / AT
 Hammerl, Oswald, Schnitzer, Turek / StadtLABOR / AT 433

Liste der Autoren

439

Session 2a

Prozessmodellierung – Effizienzsteigerung

Improved ORC Process for Power Production by using Low Temperature Heat

Krail / FH Burgenland GmbH / AT
Beckmann / Technical Office Beckmann / AT
Schittl / Forschung Burgenland GmbH / AT

Brennwertnutzung bei der Holzverbrennung

Floss, Hilbe / Hochschule Biberach / DE

Datengetriebene Modellierung einer Zweibettwirbelschicht- Gaserzeugungsanlage

Stanger, Kozek, Schirrer / TU Wien / AT

Improved ORC Process for Power Production by using Low Temperature Heat

J. Krail

University of Applied Sciences Burgenland, Department Energy and Environment, Pinkafeld, Austria

G. Beckmann

Technical Office for Mechanical and Energy Engineering Beckmann, Vienna, Austria

F. Schittl

Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: Organic Rankine Cycles (ORC) are a modification of the classical water-steam process and are particularly suitable for electricity generation from low and medium temperature heat sources, e.g., industrial waste heat or geothermal energy. In contrast to the water-steam process, the ORC process uses organic fluids as working fluids. When using working fluids of the dry class (e.g. n-pentane), a recuperator is frequently installed in state-of-the-art ORC processes to increase the cycle efficiency. This paper analyses an improved ORC process design: A liquid working fluid stream is mixed with the vapour flow between the high-pressure stage and the medium-pressure stage of the turbine. Furthermore, the recuperator is replaced by a spray condenser. These two improvements were analysed by thermodynamic process simulations. As a use case, electricity production from clinker cooler waste heat at a temperature level of 275 °C was simulated. The improved process as described would lead to an increase in the overall net efficiency up to 14 %, compared to a state-of-the-art ORC process.

1. INTRODUCTION

1.1 STATE OF KNOWLEDGE IN ELECTRICITY GENERATION BY ORC PROCESSES

Electricity generation from low-temperature heat, such as waste heat, represents a significant contribution to fossil fuel substitution and a reduction in the CO₂ intensity of energy supply. According to a study by Oxford University, around 50 % of global energy consumption is expected to end up as waste heat by 2030. Economically viable waste heat utilization will thus play a substantial position in the energy transition (Firth et al. 2019). A number of studies are devoted to estimating the existing and usable waste heat potential (Brueckner et al. 2014; Miró et al. 2015; Su et al. 2021).

One of the most promising options for the conversion of waste heat to electricity is the Organic Rankine Cycle (ORC) process. In Europe, the waste heat that may be used by ORC plants is estimated to be around 20,000 GWh, which corresponds to a CO₂ saving of around 7.6 million tonnes (Campana et al. 2013). ORC processes are mainly used for electricity generation in the fields of geothermal energy, biomass, industrial waste heat or solar thermal energy. The annual installed capacity of ORC plants has steadily increased over the last 15 years. At the end of 2016, 1,754 plants with a total installed capacity of around 2,701 MW were installed worldwide (Tartière & Astolfi 2017).

There are suggestions for improvement of this technology, but according to the current state of knowledge, they require more complex and sophisticated power plant cycles (Lecompte et al. 2015). To expand the usable potential of low-temperature heat, the market also requires, among other things, cost efficiency, the utilization of low-exergy sources, acceptance by the operator and an entry-level technology (Loni et al. 2021).

The ORC technology can be adapted to different heat sources by selecting the appropriate working fluid. This results in a wide range of applications, with a minimum off-heat temperature of approximate-

ly 80 °C. Output power ranges from small plants with an electrical output of a few kW to power plants in the double-digit MW range. (Feng et al. 2015; Exergy International Srl 2021; Center for promotion of sustainable energy 2018; Li et al. 2020)

The subcritical ORC process is well established in electricity generation from waste heat and also in geothermal plants (Vaccaro & Franco 2016). More recent ORC technologies propose the following efficiency-enhancing developments:

- Selection of the process fluid:
 - selection procedures (White & Sayma 2020; Darvish et al. 2015)
 - zeotropic fluid mixtures (Zhou et al. 2016; Zhi et al. 2020)
- Process design:
 - dual-pressure processes (Wang & Yuan 2020; Wang et al. 2019)
 - dual-loop processes (Boodaghi et al. 2021; Emadi et al. 2020; Valencia et al. 2021)
 - novel ORC-architectures for waste heat recovery (Lecompte et al. 2015)
 - trans- and supercritical process design (Song et al. 2020; Mohammed et al. 2020; Hassani et al. 2020).
- Optimisation of the process components (Witanowski et al. 2020; Chatzopoulou et al. 2019) and the use of novel process components (Lecompte et al. 2015; Xu & He 2011)
- Advanced control strategies (Hernandez et al. 2014; Baccioli & Antonelli 2017; Zhang et al. 2019; Imran et al. 2020)

1.2 IMPROVED ORC PROCESS DESIGN

The improved cycle aims at a relative increase of the overall efficiency beyond 10 % though using common components. The basic idea of the invention can be applied to a wide variety of designs, from highly efficient to cost-optimised, multi-purpose systems, in small to large power ranges. Unconventional ways of removing condensing heat and of extracting useful heat are central features of the proposed thermodynamic cycle. Despite the novelty, well-known process steps (e.g. de-superheating by means of liquid injection) are used at the component level.

The improved ORC process design (Fig. 1, right) is characterized by the fact that preheated working fluid is mixed to the vapour flow between the high-pressure and medium-pressure stage of the turbine (MI MP - mixing chamber, medium pressure stage). In a further step, mixing takes place also after the medium pressure stage of the turbine, before the condenser (MI LP - mixing chamber, low pressure (exhaust vapour)). This renders unnecessary the recuperator heat exchanger that is usually part of a state-of-the art ORC process (component R in Fig. 1, left). Furthermore, the mass flow of the working fluid increases in the preheater and in the medium pressure stage of the turbine, which leads to a higher energy output and an increase of the overall cycle efficiency.

The expenditures, compared to a common ORC, are:

- a. The use of a turbine with two casings (similar to a steam reheat turbine)
- b. The introduction of de-superheating at the intermediate pressure level to increase efficiency (spray de-superheating is a widely used component in steam power plant to control temperatures)
- c. The additional introduction of de-superheating at the low-pressure level, before condensation, to enhance heat transfer at the condenser
- d. The provision of a preheater with a somewhat larger heat transfer surface
- e. The optional replacement of the tube to shell condenser by a spray condenser (an occasionally used technology in steam power plants in connection with dry cooling tower system), doing the job of de-superheating and condensing in one step.

Evidentially the point a. seems to be the most severe expenditure: on the other hand, a turbine with two casings eases the way to a combined heat and power generation in waste heat recovery. The use of condenser-side options may adversely lead to a simplification.

A patent application has been filed for this improved process design, and a national (Austrian) patent (Beckmann & Krail 2019) has already been granted; the international patent application (Krail & Beckmann 2019) is under review.

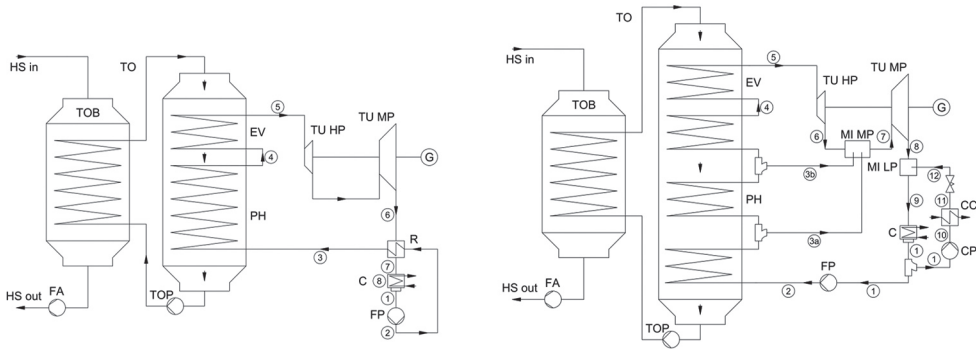


Fig. 1: Flow diagram of a state-of-the-art ORC process (left), and of the improved ORC process (right), both applied to waste heat recovery from hot air from a clinker cooler

Fig. 2 shows the state-of-the-art ORC process and the improved ORC process for the working fluid n-pentane in the T-s diagram, in order to illustrate the thermodynamic advantages of the improved ORC process design.

Dry class working fluids have the characteristic that the exhaust vapour state after expansion is in the superheated state. This has the advantage that the vapour does not have to be superheated before entering the turbine, which is particularly relevant for low-temperature processes. However, this overheating of the exhaust vapour at the turbine outlet has thermodynamic disadvantages, which are partly compensated by a recuperator heat exchanger in state-of-the-art processes, see Fig. 1 (left) and Fig. 2 (left).

In contrast to the state-of-the-art process, in the improved ORC process the superheating of the turbine exhaust vapour is reduced by an adding working fluid after the high-pressure stage of the turbine. This is carried out until the state of the vapour entering the medium pressure stage of the turbine is on the saturated vapour line. This increases the mass flow through the medium-pressure stage of the turbine, resulting in a higher turbine power output. Furthermore, working fluid is again added after the turbine's medium pressure stage in the form of a spray condenser, which has the effect of avoiding the recuperator in the improved ORC process. The absence of the recuperator's pressure loss allows expansion to a lower exhaust vapour pressure level, compared to the state-of-the-art ORC process, see Fig. 1 (right) and Fig. 2 (right). This leads to a higher enthalpy gradient at the turbine stages, which increases the turbine power output. For simplification, the improved ORC process is shown in Fig. 2 with only one mixing step (3a) and without a condensate cooler (CC).

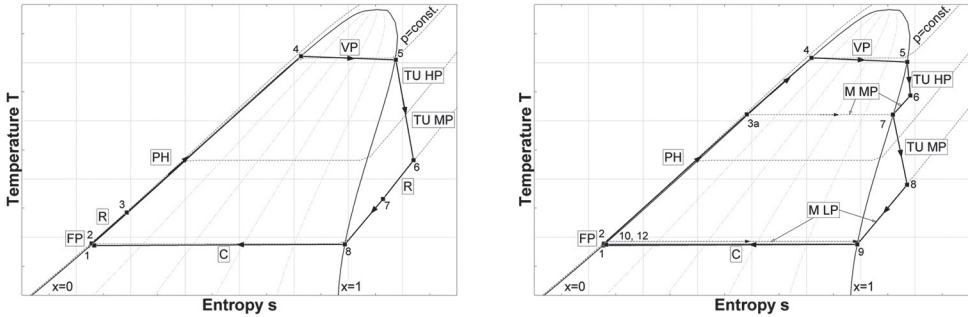


Fig. 2: T-s Diagram of the state-of-the-art ORC process (left) and the improved ORC process (right)

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 ENERGY BALANCE AND PROCESS EFFICIENCY

The energy balance of the investigated ORC processes was based on mass and energy balances for steady state flow process, according to equation (1) and (2), where the index “IN” stands for the mass and energy flows entering the system and the index “OUT” for the energy and mass flows leaving the system. In the following calculations, heat losses were neglected for all components (units and pipes). For heat exchangers, a pressure drop was calculated, but assumed to be zero for pipes.

$$\sum \dot{m}_{IN} = \sum \dot{m}_{OUT} \tag{1}$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_{OUT} \times h_{OUT} - \sum \dot{m}_{IN} \times h_{IN} \tag{2}$$

The process evaluation was carried out on the basis of efficiency coefficients (Fig. 3). In addition to the overall net efficiency η_{NET} , the individual efficiency coefficients of the vapour generator η_B and the thermodynamic cycle η_C were also calculated.

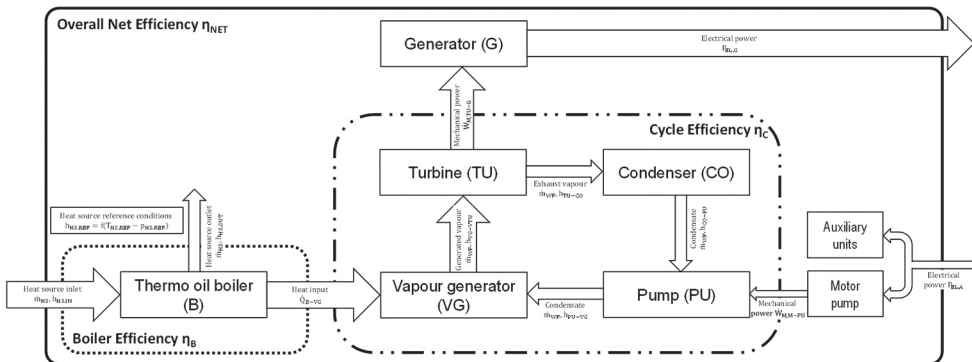


Fig. 3: Energy balance and efficiency

The efficiency of the thermo oil boiler η_B was calculated according to equation (3). Due to the fact that waste heat serves as a heat source for the investigated processes, the heat input into the vapour generator is referred to reference conditions ($T_{HS,REF} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{HS,REF} = 1.013 \text{ bar}$) that are commonly used in power plant engineering. The output is defined as the thermal power transferred to the cycle, with heat losses neglected for the vapour generator and for all heat exchangers and pipes.

$$\eta_B = \frac{\dot{Q}_{B-VG}}{\dot{Q}_{HS-REF}} = \frac{\dot{m}_{WF}(h_{VG-TU} - h_{PU-VG})}{\dot{m}_{HS}(h_{HS,IN} - h_{HS,REF})} \quad (3)$$

For the calculation of cycle efficiency η_C , the output of the expansion machine was considered as the useful power. The input power is the thermal power of the vapour generator, the power supplied to the cycle for the operation of the pump was considered, too (equation (4)).

$$\begin{aligned} \eta_C &= \frac{\dot{W}_{TU-G} - \dot{W}_{M-PU}}{\dot{Q}_{B-VG}} \\ &= \frac{\dot{m}_{WF}(h_{VG-TU} - h_{TU-C}) - \dot{m}_{WF}(h_{PU-VG} - h_{CO-PU})}{\dot{m}_{WF}(h_{VG-TU} - h_{PU-VG})} \end{aligned} \quad (4)$$

Although the use case investigated here is a process where the heat source is available as waste heat, it is appropriate for economic reasons to consider the overall net efficiency η_{NET} as the most relevant criterion for the process comparison with a conventional state-of-the-art ORC process. It relates the net electrical output of the process to the amount of waste heat based on the reference conditions mentioned above and represents the “yield” of electrical power from an existing / available waste heat source (equation (5)). For the net electrical output of the process, all outputs for operating auxiliary units were subtracted from the electrical output of the generator. The auxiliary units were the pump for the working fluid, the thermal oil pump, as well as the electrical power for the fan of the air condenser and the electrical power for the waste heat ventilator for covering the pressure loss of the thermo oil boiler.

$$\eta_{NET} = \frac{P_{EL,G} - \sum P_{EL,A}}{\dot{Q}_{HS-REF}} = \frac{P_{EL,G} - \sum P_{EL,A}}{\dot{m}_{HS}(h_{HS,IN} - h_{HS,REF})} \quad (5)$$

2.2 PROCESS SIMULATION

The simulation of the processes was carried out with the commercial simulation software IPSEpro (SimTech GmbH 2021). Fig. 4 describes the steps of thermodynamic process simulation. In the model library, the individual units that are used to design the process are described with thermodynamic mass and energy balance equations. Furthermore, the thermodynamic fluid properties are also calculated in the model library. The database used for calculation is the “RefProp” database (NIST - National Institute of Standards and Technology 2013). The IPSEpro library for low-temperature processes “LTP-Lib - Low-Temperature Processes” (SimTech GmbH 2016) was used as model library.

IPSEpro “PSE - Process Simulation Environment” (SimTech GmbH 2017a) offers a visual programming interface for the modelling, simulation and optimisation of thermodynamic cycles. The IPSEpro equation solver, which is part of the simulation environment, is based on a Newton-Raphson algorithm (SimTech GmbH 2014a). The optimisation module “PSOptimize” (SimTech GmbH 2014b) allows process multivariate optimisation. Free equations can be used to define additional variables, e.g. for the calculation of efficiency coefficients. By means of the additional module “PSXLink” (SimTech GmbH 2017b), parameter variations can be carried out in Excel.

In the simulation model, the processes to be analysed are designed based on units available in the model library, and then appropriate boundary conditions are added.

The simulation result delivers the results of the parameter variation and the process optimisation based on process-specific indicators, such as efficiency factors. Furthermore, simulation results can be displayed as diagrams (e.g. T-s diagram).

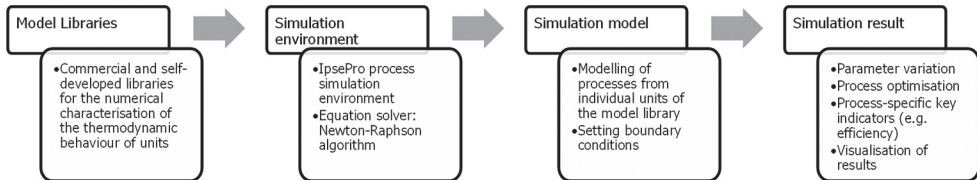


Fig. 4: Structure of the simulation environment IPSEpro

2.3 COMPARISON OF THE IMPROVED ORC PROCESS WITH THE STATE-OF-THE-ART ORC PROCESS

The suitability and advantages of the improved ORC technology depends on boundary conditions and parameters that are specific for the project, process, and plant being studied.

First, there is the selection of the working fluid. As already mentioned, the thermodynamic advantages are predicated on organic working fluids of the dry class, but even within this class, the entropy reductions at the saturated vapour line during expansion can vary. Another determining factor is the waste heat source itself, with its yield and temperature. Current research is not known to allow generally valid and quantifiable statements about the thermodynamic advantages with the different parameters and parameter combinations. Therefore, the following comparison is based on a selected, actually implemented and comprehensively documented ORC plant, according to the state-of-the-art, for the conversion of hot air from the clinker coolers of a cement factory into electricity (Heidelberger Cement AG 2001; Umweltbundesamt 2010). The improved ORC process is designed for this same application.

In order to ensure an equal comparison of performance data and yields between the two processes, the same boundary conditions were set in both cases (Tab. 1). The following simulations refer to an input waste heat stream at 275 °C and a heat input of 14 MW, based on reference conditions. N-pentane is used as the working fluid in the well-documented state-of-the-art process, and so it was also chosen for the improved design. The isentropic efficiency of the turbine was calculated on the basis of design data from Heidelberger Cement AG (2001) and subsequently assumed to be 74.5 % for both comparative processes in the respective turbine stages. On the heat sink side, an ambient temperature of 11 °C was assumed in each case. The thermodynamic comparability of the heat exchangers was ensured by assuming the same minimum temperature difference between the hot and cold fluid of the heat exchanger. Since the recuperator is no longer required in the improved process, the turbine can expand to a lower condensation pressure by omitting the pressure drop of the recuperator.

Tab. 1: Boundary conditions

	State-of-the-art ORC process ¹	Improved ORC process	Unit
Waste heat input (hot air from clinker cooler)			
Waste heat input – temperature $T_{HS,IN}$	275	275	°C
Waste heat input – mass flow \dot{m}_{HS}	55	55	kg/s
Waste heat input $\dot{Q}_{HS,REF}^2$	14,000	14,000	kW
ORC process			
Working fluid	n-Pentane	n-Pentane	
Thermo oil boiler – min. temp. difference $\Delta T_{TOB,MIN}$	37.9	37.9	K
Vapour generator – min. temp. difference $\Delta T_{VG,MIN}$	14.0	14.0	K
Recuperator – min. temp. difference $\Delta T_{R,MIN}$	28.9	-	K
Generator – electric efficiency $\eta_{EL,G}$	98.0	98.0	%
Generator – mechanic efficiency $\eta_{M,G}$	97.0	97.0	%
Motor – electric efficiency $\eta_{EL,MO}$	95.0	95.0	%
Motor – mechanic efficiency $\eta_{M,MO}$	97.0	97.0	%
Pump – isentropic efficiency $\eta_{IS,PU}$	78.5	78.5	%
Pump – mechanic efficiency $\eta_{M,PU}$	97.0	97.0	%
Turbine – isentropic efficiency $\eta_{IS,TU}$	74.5	74.5	%
Turbine – mechanic efficiency $\eta_{M,TU}$	98.0	98.0	%
Turbine – exhaust vapour pressure $p_{TU,OUT}^3$	1.03	0.98	bar
Condenser (cooling medium ambient air)			
Condenser – inlet temperature $T_{CO,IN}$	11	11	°C
Condenser – outlet temperature $T_{CO,OUT}$	33	33	°C

¹ State-of-the-art ORC process, boundary conditions based on Heidelberger Cement AG (2001) and Umweltbundesamt (2010)

² based on reference conditions $T_{HS,REF} = 25$ °C and $p_{HS,REF} = 1.013$ bar

³ the lack of a recuperator-caused pressure loss in the improved process causes a lower exhaust vapour pressure at the turbine outlet

3. RESULTS

Parameter studies were carried out for the two processes, whereby both processes were investigated with a focus on maximising the overall net efficiency, using the IpsePro optimisation algorithm PSOptimize. While the process-external boundary conditions were kept constant, the vapour pressure entering the high-pressure stage of the turbine was varied. In the case of the improved process, for each pressure variation of the vapour pressure entering the high-pressure stage of the turbine, the pressure level of the intermediate pressure was also optimised with a focus on maximising the net overall efficiency. In both cases, the pressure variation of the vapour was carried out in the subcritical pressure range of the working fluid n-pentane.

Based on these simulations, an optimum vapour pressure was calculated for each individual process (Fig. 5). The simulation results show that cycle efficiency increases with increasing vapour pressure en-

tering the high-pressure stage of the turbine, which is to be expected thermodynamically. As the vapour pressure increases, the boiler efficiency decreases due to an increase in the output temperature of the waste heat source from the boiler. This effect is much more evident in the state-of-the-art ORC process than in the improved ORC process. The final result shows that with the state-of-the-art ORC process the maximum overall net efficiency is reached at a vapour pressure entering the high-pressure stage of the turbine of $p_5=16.5$ bar; the achieved overall net efficiency is $\eta_{NET}=8.05$ %. With the improved ORC process the maximum overall net efficiency exceeds the respective values of the state-of-the-art ORC at any pressure: at vapor pressure of $p_5=20$ bar the relative increase of the overall net efficiency of the 11.4 % is reached. At the thermodynamically optimum vapour pressure of $p_5=32$ bar the improved ORC process reaches an overall net efficiency of $\eta_{NET}=9.17$ %, which means an increase of the overall net efficiency of 14 % relative to the state-of-the-art ORC process (Fig. 6). The detailed simulation results of both variants are shown in Tab. 2. The results apply to optimal vapour pressure in each case. In case of a realistic plant layout, the chosen vapor pressures is commonly lower than the thermodynamically optimum pressure. Generally, the idea of the improved cycle favours the application of higher pressure level on the working fluid side.

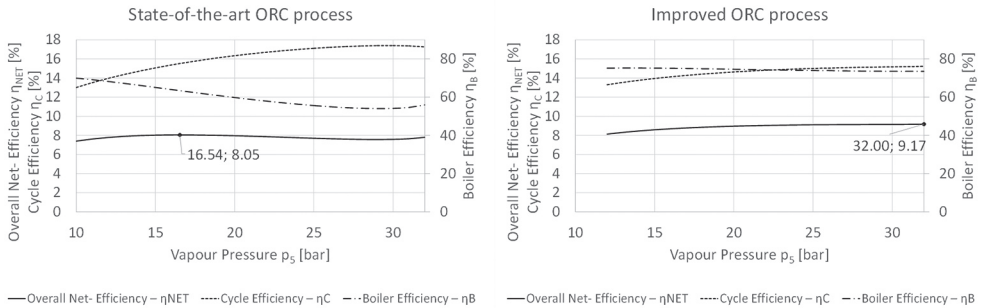


Fig. 5: Parameter study of the state-of-the-art ORC process (left) and the improved ORC process (right) with focus on the boiler efficiency, cycle efficiency and net efficiency. The pair of values shown in both graphs denotes the optimization result for the overall net efficiency

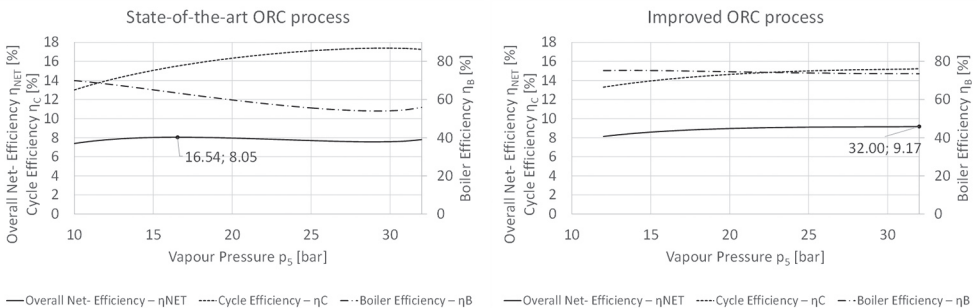


Fig. 6: Comparison of the net efficiency of the ORC processes at varying vapour pressure entering the turbine (left) and relative increase of the net efficiency of the improved ORC process based the state-of-the-art ORC process at optimum operation point (right)

Tab. 2: Simulation results at optimum operation point

	State-of-the-art ORC process	Improved ORC process	Unit
Energy balance			
Waste heat – input temperature $T_{HS,IN}$	275	275	°C
Waste heat – output temperature $T_{HS,OUT}$	117	93	°C
Turbine inlet – vapour pressure p_s	16.5	32.0	bar
Thermo oil boiler – transferred heat \dot{Q}_B	8,875	10,259	kW
Vapour generator – transferred heat \dot{Q}_{VG}	8,911	10,294	kW
Recuperator – transferred heat \dot{Q}_R	1,030	-	kW
Condenser – transferred heat \dot{Q}_{CO}	7,528	8,724	kW
Generator – electrical power $P_{EL,G}$	1,353	1,586	kW
Auxiliary units (Pumps + fans) – electr. power $P_{EL,A}$	227	304	kW
Electrical net power output $P_{EL,NET}$	1,126	1,282	kW
Efficiency			
Boiler efficiency – η_B	63.4	73.3	%
Cycle efficiency – η_C	15.5	15.3	%
Overall net efficiency – η_{NET}	8.05	9.17	%
Relative increase Overall net efficiency – $\Delta\eta_{NET,REL}$	0	14	% _{REL}

4. CONCLUSIONS

The improved process design leads to adaptations in the process layout. A fluid flow is mixed in after the high-pressure stage of the turbine via a branch from the preheater of the vapour generator. This increases the mass flow through the preheater as well as the mass flow of the medium-pressure stage of the turbine. The recuperator, which is frequently used for dry class working fluids, can be omitted and is replaced by a spray condenser after the intermediate pressure stage of the turbine. Consequently, the condensation pressure decreases due to the elimination of the pressure drop of the recuperator and a higher enthalpy drop at the expansion turbine can be achieved. Although the cycle efficiency of the improved ORC process decreases slightly, but the boiler efficiency increases significantly, the heat source can be better utilised. In total, the measures mentioned lead to an increase in the overall net efficiency up to 14 % relative to the state-of-the-art ORC design, as determined at the optimal operating point of each process.

NOMENCLATURE

Δ	difference	\dot{Q}	thermal power (kW)
η	efficiency (%)	\dot{W}	mechanical power (kW)
h	enthalpy (kJ/kg)	s	entropy
\dot{m}	mass flow (kg/s)	T	temperature (°C)
P	electrical power (kW)	x	vapour quality
p	pressure (bar)		

ABBREVIATIONS

A	auxiliary units (electric motors)	MI	mixing chamber
B	boiler	MIN	minimum
C	cycle	MO	motor
CO	condenser	MP	medium pressure stage
CC	condensate cooler	OUT	outlet stream
CP	condensate pump	PH	preheater
EL	electric	PU	pump
EV	evaporator	R	recuperator
FA	fan	REF	reference conditions
FP	feed pump	REL	relative
G	generator	TO	thermo oil
IN	inlet stream	TOB	thermo oil boiler
IS	isentropic	TOP	thermo oil pump
HP	high pressure stage	TU	turbine
HS	heat source	VG	vapour generator
M	mechanic	WF	working fluid
NET	net value	WHS	waste heat source
LP	low pressure (exhaust vapour)	WHR	waste heat recovery

REFERENCES

- Baccioli A. and Antonelli M. (2017) Control variables and strategies for the optimization of a WHR ORC system. *Energy Procedia*, 129: 583–590.
- Beckmann G. and Krail J. (2019) Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz in Clausius-Rankine-Kreisprozessen (Patent Nr.: AT521050B1).
- Boodaghi, H., Etghani M. M. and Sedighi K. (2021) Performance analysis of a dual-loop bottoming organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery of a heavy-duty diesel engine, Part I: Thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management* (on-line): 113830. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890421000078>.
- Brueckner S., Miró L., Cabeza L. F., Pehnt M. and Laevemann E. (2014) Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions - A categorization and literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38: 164–171.
- Campana F., Bianchi M., Branchini L., De Pascale A., Peretto A., Baresi M., Fermi A., Rossetti N. and Vescovo R. (2013) ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. *Energy Conversion and Management*, 76: 244–252.
- Center for promotion of sustainable energy (2018) Velika Ciglena geothermal power plant starts operation (online). <https://balkangreenenergynews.com/velika-ciglena-geothermal-power-plant-starts-operation/>. Retrieved from 20. January 2021.
- Chatzopoulou M. A., Lecompte S., Paepe M. De and Markides C. N. (2019) Off-design optimisation of organic Rankine cycle (ORC) engines with different heat exchangers and volumetric expanders in waste heat recovery applications. *Applied Energy*, 253.
- Darvish K., Ehyaei M. A., Atabi F. and Rosen M. A. (2015) Selection of optimum working fluid for organic rankine cycles by exergy and exergy-economic analyses. *Sustainability (Switzerland)*, 7: 15362–15383.

- Emadi M. A., Chitgar N., Oyewunmi O. A. and Markides C. N. (2020) Working-fluid selection and thermoeconomic optimisation of a combined cycle cogeneration dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system for solid oxide fuel cell (SOFC) waste-heat recovery. *Applied Energy*, 261.
- Exergy International Srl (2021) *Technology - ORC* (online). <https://www.exergy-orc.com/orc>. Retrieved from 20. January 2021.
- Feng Y., Hung T. C., Greg K., Zhang Y., Li B. and Yang J. (2015) Thermoeconomic comparison between pure and mixture working fluids of organic Rankine cycles (ORCs) for low temperature waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 106: 859–872.
- Firth A., Zhang B. and Yang A. (2019) Quantification of global waste heat and its environmental effects. *Applied Energy*, 235: 1314–1334.
- Hassani Mokarram N. and Mosaffa A. H. (2020) Investigation of the thermoeconomic improvement of integrating enhanced geothermal single flash with transcritical organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 213.
- Heidelberger Cement AG (2001) Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG. Augsburg.
- Hernandez A., Desideri A., Ionescu C., Quoilin S., Lemort V. and De Keyser R. (2014) Increasing the efficiency of Organic Rankine Cycle technology by means of multivariable Predictive Control. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19: 2195–2200.
- Imran M., Pili R., Usman M. and Haglind F. (2020) Dynamic modeling and control strategies of organic Rankine cycle systems: Methods and challenges. *Applied Energy*, 276.
- Krail J. and Beckmann G. (2019) Verfahren und Vorrichtung zur Wandlung von thermischer in mechanische bzw. elektrische Energie (Patent Nr.: WO2019/227117A1).
- Lecompte S., Huisseune H., van den Broek M., Vanslambrouck B. and De Paepe M. (2015) Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (on-line), 47: 448–461. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115002427>.
- Li Y. M., Hung T. C., Wu C. J., Su T. Y., Xi H. and Wang C. C. (2020) Experimental investigation of 3-kW organic Rankine cycle (ORC) system subject to heat source conditions: A new appraisal for assessment. *Energy*, 217: 119342.
- Loni R., Najafi G., Bellos E., Rajae F., Said Z. and Mazlan M. (2021) A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 287.
- Miró L., Brückner S. and Cabeza L. F. (2015) Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 847–855.
- Mohammed A. G., Moleh M., El-Maghlany W. M. and Ammar N. R. (2020) Performance analysis of supercritical ORC utilizing marine diesel engine waste heat recovery. *Alexandria Engineering Journal*, 59: 893–904.
- NIST - National Institute of Standards and Technology (2013) REFPROP - NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties.
- SimTech GmbH (2021) *IPSEpro - Software system for calculating heat balances and simulating processes* (online). <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro>. Retrieved from 23. June 2021.
- SimTech GmbH (2016) *IPSEpro LTP_Lib - Low Temperature Process Library*. <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro/model-libraries/low-temperature-process-library>.
- SimTech GmbH (2014a) *IpsePro Process Simulation Environment (Manual Version 6.0.001)*. Graz.
- SimTech GmbH (2017a) *IpsePro PSE - Process Simulation Environment*. <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro/program-modules/pse>.
- SimTech GmbH (2014b) *IPSEpro PSOptimize - Parameter Optimization*. <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro/program-modules/psoptimize>.

- SimTech GmbH (2017b) IPSEPro PSXLink - Integration with Microsoft Excel. <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro/program-modules/psxlink>.
- Song J., Li X., Wang K. and Markides, C. N. (2020) Parametric optimisation of a combined supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for internal combustion engine (ICE) waste-heat recovery. *Energy Conversion and Management* 218.
- Su Z., Zhang M., Xu P., Zhao Z., Wang Z., Huang H. and Ouyang T. (2021) Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. *Energy Conversion and Management*, 229.
- Tartière T. and Astolfi M. (2017) A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia* (on-line), 129: 2–9. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217340286>.
- Umweltbundesamt (2010) *Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zement-, Kalk- und Magnesiumoxidindustrie*. Dessau.
- Vaccaro M. and Franco A. (2016) Recent trends in research and application of ORC plants for geothermal energy use. In: *European Geothermal Congress 2016*. Strasbourg.
- Valencia G., Fontalvo A. and Duarte Forero J. (2021) Optimization of waste heat recovery in internal combustion engine using a dual-loop organic Rankine cycle: Thermo-economic and environmental footprint analysis. *Applied Thermal Engineering*, 182.
- Wang M., Zhang J., Zhao S., Liu Q., Zhao Y. and Wu H. (2019) Performance investigation of transcritical and dual-pressure Organic Rankine Cycles from the aspect of thermal match. *Energy Conversion and Management*, 197.
- Wang S. and Yuan Z. (2020) A hot water split-flow dual-pressure strategy to improve system performance for organic Rankine cycle. *Energies*, 13.
- White M. T. and Sayma A. I. (2020) Fluid selection for small-scale rankine cycle plants: Can you draw some lines in the sand? In: *International Rankine 2020 Conference -Heating, Cooling and Power Generation (IIR)*. Glasgow. pp.305–310.
- Witanowski Ł., Klonowicz P., Lampart P., Suchocki T., Jędrzejewski Ł., Zaniewski D. and Klimaszewski P. (2020) Optimization of an axial turbine for a small scale ORC waste heat recovery system. *Energy*, 205.
- Xu R.-J. and He Y.-L. (2011) A vapor injector-based novel regenerative organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering* (on-line), 31: 1238–1243. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431110005429>.
- Zhang J., Li K. and Xu J. (2019) Recent developments of control strategies for organic Rankine cycle (ORC) systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41: 1528–1539.
- Zhi L. H., Hu P., Chen L. X. and Zhao G. (2020) Performance analysis and optimization of engine waste heat recovery with an improved transcritical-subcritical parallel organic Rankine cycle based on zeotropic mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 181.
- Zhou Y., Wu Y., Li F. and Yu L. (2016) Performance analysis of zeotropic mixtures for the dual-loop system combined with internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 118: 406–414.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was previously been published and presented online at the international conference “6th International Seminar in ORC Power Systems” in Munich (Germany) at 11 – 13 October 2021. The authors would like to thank the organising committee of the ORC2021 conference and the reviewers for reviewing the paper.

CONTACT

Prof.(FH) DI DI(FH) Jürgen Krail
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld
Email: juergen.krail@fh-burgenland.at

Brennwertnutzung bei der Holzverbrennung

A. G. Floss, F. Hilbe

Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach, Deutschland

ABSTRACT: The energy turnaround is characterized by reducing the consumption of final energy and the substitution of fossil energy sources by regenerative ones.

One important pillar is the energetic use of wood in its various forms of utilization. This renewable energy source is largely climate-neutral and is available in many countries, such as Germany, in large but not unlimited quantities. This limited availability as well as the problem of air pollution by fine dust and other pollutants that are produced during the combustion of wood, demand an economical use of wood as an energy source.

Particularly when wood chips are burned, the high moisture content produces a great deal of water vapor, which is usually discharged through the chimney unused for energy purposes. When using condensing technology, which is state of the art for gas and oil heating systems today, the exhaust gases are cooled below the dew point. Thus, the heat of condensation released in this process can be fed into the heating system, resulting in efficiency gains and fuel savings.

This paper shows the theoretical energy-saving potential by the use of condensing heat in the field of wood combustion, under varied boundary conditions (excess combustion air and exhaust gas temperature).

The theoretical calculations show realistic efficiency increases of 30 % (in extreme cases also almost 45 %) and have been validated by initial measurements on a real plant.

1. EINLEITUNG

Trockenheit, Hitze, Wetterextreme – der Klimawandel konfrontiert uns zunehmend mit gewaltigen Problemen. Die vom Menschen verursachte Klimaerwärmung wird zunehmend als Bedrohung wahrgenommen. Es ist wissenschaftlich bewiesen, dass fossile Energieträger durch den Ausstoß von Treibhausgasen einen Großteil des globalen Temperaturanstieges verursachen. Um die Veränderung des Klimas einzudämmen, muss der Energieverbrauch drastisch reduziert werden und die fossilen Energieträger müssen durch erneuerbare ersetzt werden. Dies wird auch in Deutschland, wo gegenwärtig immer noch knapp 80 % des gesamten Energieverbrauchs durch fossile Energieträger, und nur ca. 15 % durch regenerative Energieträger (Umweltbundesamt 2020) gedeckt werden, zu umfangreichen Veränderungen führen.

Ein wichtiges Standbein ist dabei die energetische Nutzung von Holz in seinen unterschiedlichen Formen - Stückholz, Pellets, Hackschnitzel und Holzabfälle. Der Primärenergieträger Holz ist nachhaltig und in Deutschland und vielen weiteren Ländern in großem Umfang verfügbar. Insbesondere die Verwendung von Holzhackschnitzeln in der Nah- und Fern-Wärmeversorgung sowie für industrielle Hochtemperatur-Anwendungen kann einen wesentlichen Beitrag gegen den weltweiten Klimawandel leisten. Darüber hinaus erlaubt die gute, auch saisonale Speicherbarkeit eine sinnvolle Ergänzung zu volatilen Energieträgern wie Sonne und Wind.

Im Süddeutschen Raum sowie speziell in Österreich und der Schweiz gibt es bereits zahlreiche Nahwärmenetze, die überwiegend mit Holzhackschnitzeln beheizt werden. Ihre Anzahl wächst ständig. Zum Einsatz kommen in der Regel Standardkessel mit Abgastemperaturen in einer Größenordnung von 180 °C. Hier verlässt der bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf das Heizungssystem ungenutzt. Die Wirkungsgrade, die sich mit dieser Standardkesseltechnologie erreichen lassen, liegen in einer Größenordnung von 85 bis max. 90 %.

Die Brennwertnutzung, die im Bereich der Gas- und Ölheizungen heute zur Standardtechnologie gehört, kommt bei der Holzverbrennung derzeit nur in sehr geringem Umfang zum Einsatz. Dabei kann Brennwerttechnologie, die nach einer Abgasreinigung auch bei der Holzverbrennung durchgeführt werden kann, einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung und damit zur Brennholz-Einsparung liefern. Und dies ist wichtig - denn zum einen sind die Mengen an Energieholz, die nachhaltig bereitgestellt werden können, begrenzt, zum anderen entstehen bei der Verbrennung von Holz auch unerwünschte Schadstoffe wie Feinstaub, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Stickoxide, so dass Holz möglichst sparsam eingesetzt werden sollte.

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die Effizienzsteigerung bzw. das Einsparpotential durch Nutzung der Kondensationswärme aus den Abgasen der Holzverbrennung in Abhängigkeit von den Randbedingungen (Abgastemperatur und Verbrennungsluftüberschuss) darzustellen.

2. EFFIZIENZSTEIGERUNG BEI DER HOLZVERBRENNUNG

Bei der Verheizung von Kohlenwasserstoffverbindungen – hierzu zählen z.B. Erdgas, Heizöl, aber auch Holz - entsteht durch die Verbrennung des im Brennstoff enthaltenen Wasserstoffs immer Wasserdampf. Zum Schutz vor Korrosion und Versottung von Heizkessel und Schornstein wurde dieser Wasserdampf bei Altanlagen mit hohen Temperaturen möglichst schnell an die Umgebung entsorgt. Die im Wasserdampf vorhandene latente Wärme konnte somit nicht genutzt werden. Da hierdurch nicht unerhebliche Energiemengen verloren gingen, wurde in den zurückliegenden Jahrzehnten (seit ca. 1980) zunächst bei der Gas-, später auch bei der Ölverbrennung, die Brennwerttechnologie eingeführt. Durch ein gezieltes Abkühlen der Abgase meist mit Hilfe niedriger Rücklaufemperaturen lässt sich zumindest ein Teil des Wasserdampfes - abhängig von Abgastemperatur und Luftüberschuss - kondensieren und die dabei gewonnene Kondensationswärme im Heizungssystem nutzen. Abb. 1 gibt die maximale Erhöhung der auf den Heizwert bezogenen zusätzlichen Energieausbeute (Brennwertnutzen) für verschiedene Energieträger in Prozent an, wenn die Abgase auf 15 °C abgekühlt werden.

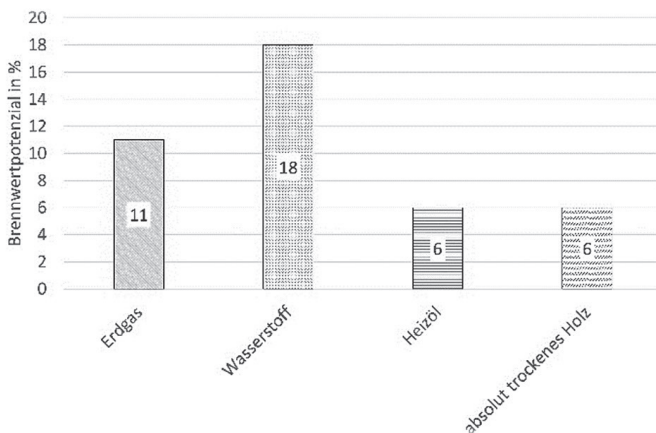


Abb. 1: Brennwertnutzungspotenzial verschiedener Brennstoffe (Gammel 2008)

Die Brennwertnutzung, bei der die Abgase unter ihren Taupunkt abgekühlt werden, ist bei der Holzverbrennung noch wenig verbreitet. Hintergrund ist die Notwendigkeit einer vorgeschalteten Abgasreinigung von Feinstaub und/oder die regelmäßige (mehrmals täglich) Reinigung der Kondensationswärmetauscher.

Der hierfür notwendige technische Aufwand scheint aber sehr lohnenswert, da die bei der Holzverbrennung in der Praxis erzielbare Effizienzsteigerung durch Brennwerttechnologie viel größer ist, als die in Abb. 1 angegebenen 6 % für absolut trockenes Holz. Dies liegt an der Holzfeuchte! Holz liegt bei der Verbrennung nie absolut trocken vor. Dessen Wassergehalt schwankt in der Regel zwischen 60 % (frisch geerntetes Holz) und 10 % (industriell getrocknetes Holz). Wird dieses mehr oder minder feuchte Holz in einem Kessel verbrannt, muss ein Teil der Energie aus der trockenen Holzmasse aufgewendet werden, um das Wasser zu verdampfen. Entweicht der Wasserdampf nun ungenutzt über den Schornstein, steht diese Energiemenge nicht mehr zur Verfügung.

Im Internet existieren zahlreiche gut übereinstimmende Quellen (Hahn 2014; C.A.R.M.E.N. 2020), die, wie in Abb. 2 dargestellt, den maximal nutzbaren Heizwert des Energieträgers Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt angeben.

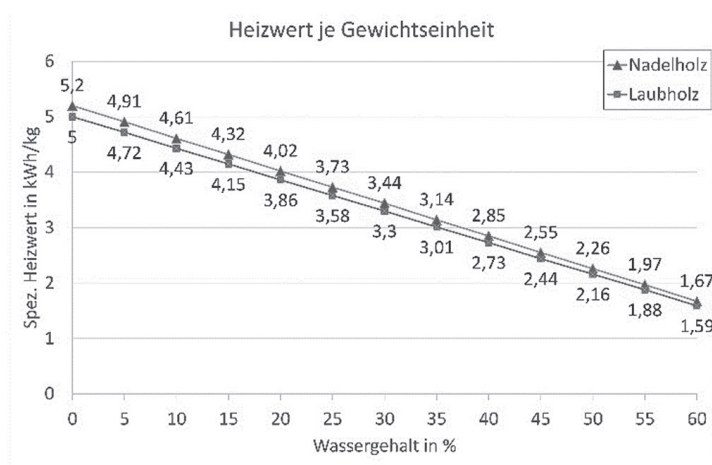


Abb. 2: Spez. Heizwert in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Nadel- und Laubholz (C.A.R.M.E.N. 2020)

Diese Verluste bei der Verbrennung lassen sich im Wesentlichen durch zwei Maßnahmen verringern:

- eine der Verbrennung vorgelagerte Holz Trocknung
- eine der Verbrennung nachgelagerte Kondensation der Abgase

Die beiden Maßnahmen können selbstverständlich auch kombiniert werden. Hierbei muss aber berücksichtigt werden, dass der Brennwerteffekt bei getrocknetem Holz deutlich niedriger ausfällt als bei feuchtem Holz, weshalb eine Kombination nur eingeschränkt sinnvoll ist.

Um Verwechslung zu vermeiden, sollen zunächst die auch häufig falsch verwendeten Begriffe der Holzfeuchte und des Wassergehalts definiert und der Zusammenhang hergestellt werden.

3. HOLZFEUCHTE UND WASSERGEHALT

Holzfeuchte und Wassergehalt geben den prozentualen Massenanteil von gebundenem Wasser im Holz bzw. Holzhackschnitzeln an. Bei der Holzfeuchte bezieht sich die Wassermasse auf die Trockenmasse - absolut vollständig getrocknetes Holz (Wittkopf 2005).

$$\text{Holzfeuchte in \%} = \frac{\text{im Holz enthaltene Wassermasse}}{\text{Trockenmasse des Holzes}} * 100 \quad (1)$$

Beim Wassergehalt hingegen bezieht sich die Wassermasse auf die Gesamtmasse des feuchten Holzes - trockenes Holz plus Wasser (Wittkopf 2005).

$$\text{Wassergehalt in \%} = \frac{\text{im Holz enthaltene Wassermasse}}{\text{Gesamtmasse des (feuchten)Holzes}} * 100 \quad (2)$$

Die Verwechslungen, auch in zahlreichen Veröffentlichungen, beruhen wohl darauf, dass bei der Qualitätsbeschreibung von Holzbrennstoffen – so auch in der DIN EN ISO 17225-4 (DIN 2014) – auf den Wassergehalt bezuggenommen wird, wohingegen die am Markt erhältlichen Hand-Messgeräte ausnahmslos die Holzfeuchte bestimmen (Schardt 2006). Abb. 3 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Wassergehalt.

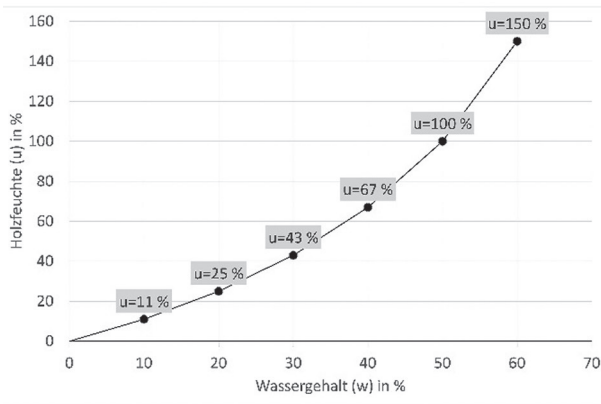


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Wassergehalt (Schardt 2006)

Liegen Wassergehalt und Holzfeuchte im unteren Bereich noch nahe beieinander, so beträgt die Holzfeuchte bei frisch geschlagenem Holz mit einem Wassergehalt von 50 bis 60 % zwischen 100 und 150 %.

4. HOLZTROCKNUNG

Vor der klassischen Stückholzverbrennung wird das Holz üblicherweise im überdachten Außenbereich mit Hilfe kostenfreier Umweltenergie (Luft und Sonne) über einen Zeitraum von 2 Jahren auf einen Wassergehalt von 15 bis 20 % getrocknet. Damit erreicht es einen Heizwert von ca. 4 kWh/kg und kann so problemfrei verbrannt werden.

Wird ein geringerer Wassergehalt gefordert, wie zum Beispiel bei Holzpellets ($w < 10\%$), wird in der Regel eine künstliche Trocknung unter Energieaufwand notwendig. Im günstigen Fall wird hierzu nicht mehr weiter verwertbare Abwärme verwendet.

Im großtechnischen und industriellen Bereich wird mit Blick auf Energieträgerkosten und automatisierte Brennstoffzufuhr der Einsatz von Holzhackschnitzeln bevorzugt. Hier bereiten allerdings Lagerung und Trocknung Probleme. Holzhackschnitzel sind ein Volumengut das viel Speicherraum

benötigt (Energiedichte ca. 650 kWh/srm bei 50 % Wassergehalt). Liegt der Wassergehalt über 25 bis 30 %, ist mit einem erheblichen mikrobiologischen Abbau der Holzschnitzel zu rechnen. Hierbei geht nicht nur Energie verloren, sondern es kommt bei der Verrottung auch zu einer Temperaturerhöhung, die nicht selten zur Selbstentzündung führt und somit eine erhebliche Brandgefahr darstellt. Vor diesem Hintergrund wird das Waldrestholz meist im Wald auf Haufen gelagert. Hierbei erfährt es eine gewisse natürliche Vortrocknung auf in der Regel 40 bis 50 % Wassergehalt. Erst relativ kurzfristig vor der Verbrennung wird es im Wald geschreddert und zum Verbrennungsort transportiert. Für eine schnelle künstliche Vortrocknung steht dann in der Regel nicht genügend billige Abwärme zur Verfügung.

Da die natürliche Trocknung viel Zeit und große Speicherkapazitäten benötigt, und die künstliche Trocknung energieaufwendig ist, ist eine weitere Möglichkeit der Effizienzsteigerung bei der Verbrennung von feuchtem Holzmaterial durchaus interessant: nämlich die Verbrennung mit anschließender Kondensation der Abgase.

5. ABGASKONDENSATION

Wie bereits erwähnt gehört die Abgaskondensation im Bereich der Öl- und Gasverbrennung zum Stand der Technik. Bei einem stöchiometrischen Luft / Brennstoffverhältnis von $\lambda = 1$ und einer Abkühlung der Abgase auf 15 °C ergibt sich bei der Erdgasverbrennung ein maximaler Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von 111 % bezogen auf den Heizwert. Wie in Abb. 4 dargestellt, ist der tatsächlich erreichbare Feuerungstechnische Wirkungsgrad aber stark von den erzielbaren Abgastemperaturen abhängig. Darüber hinaus sinkt der erreichbare Feuerungstechnische Wirkungsgrad mit steigendem Verbrennungsluftüberschuss.

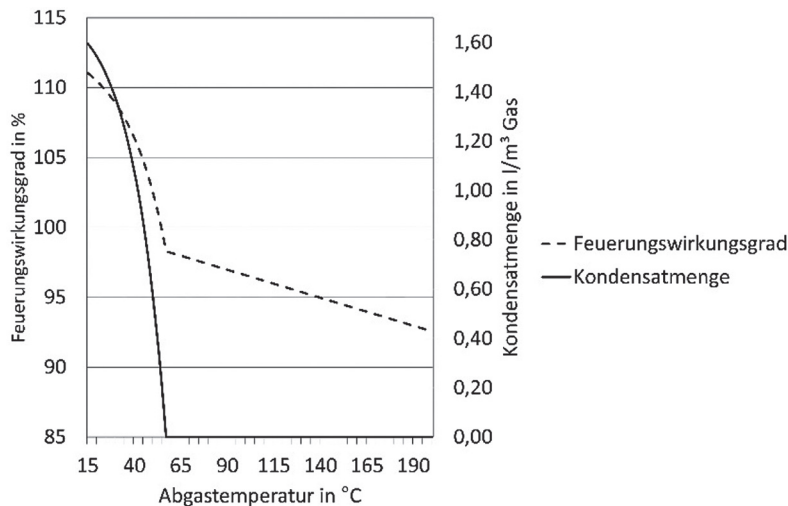


Abb. 4: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad und Kondensatmenge in Abhängigkeit von der Abgastemperatur bei der Erdgasverbrennung bei einem stöchiometrischen Luft / Brennstoffverhältnis von $\lambda = 1$ (Floß 2006)

Angaben zum Feuerungstechnischen Wirkungsgrad von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt und dem Verbrennungsluftüberschuss wurden weder in der Literatur noch im Internet gefunden.

6. THERMODYNAMIK DER VERBRENNUNGSTECHNIK

Die eigenen durchgeführten Berechnungen basieren auf den klassischen Grundlagen der Verbrennungs-Thermodynamik. Die chemischen Stoffumwandlungen werden dabei mit den thermodynamischen Hauptsätzen der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung berechnet wie es für eine ideale stationäre Gleichdruckverbrennung üblich ist. Eine solche stationären Gleichdruckverbrennung darf für Gasturbinen, aber auch für Heizkessel und Industrieöfen angenommen werden.

Die Berechnung berücksichtigt dabei lediglich die Hauptkomponenten Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H₂), Wasser (H₂O) sowie Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂). Die übrigen Brennstoff- und Luftkomponenten werden aufgrund der geringen Mengen in der vorliegenden Berechnung vernachlässigt. Die Berechnung ist, wie folgt beschrieben, aufgebaut. Zunächst wird der mindestens notwendige Sauerstoffbedarf für eine vollständige Verbrennung berechnet. Unter Berücksichtigung eines vorzuziehenden Verbrennungsluftüberschusses wird anschließend der tatsächliche Luftbedarf sowie die quantitative Rauchgaszusammensetzung bestimmt. Anhand dieser Ergebnisse werden nun die theoretische Verbrennungstemperatur sowie die spezifische Rauchgasenthalpie berechnet. Der größtenteils aus der Holzfeuchte entstandene Wasserdampf in den heißen Abgasen enthält einen sehr großen Anteil latenter Energie, welche durch Kondensation bei Unterschreiten des Taupunktes freigesetzt wird. Über die Ermittlung des Sättigungspartialdruckes in Abhängigkeit von Rauchgastemperatur und Luftüberschuss kann der im Abgas verbleibende Wasserdampfanteil sowie die auskondensierte Wassermenge bestimmt werden. Mit Hilfe der spezifischen Kondensationsenthalpie von Wasserdampf lässt sich die freigesetzte latente Energiemenge berechnen.

Die angenommene Elementarzusammensetzung des zur Berechnung herangezogenen absolut trockenen Holzes (Fichte, Tanne) ist in Tab. 1 dargestellt ist. Die Edukte Holz und Verbrennungsluft werden dem Prozess mit einer Temperatur von 15 °C zugeführt.

Tab. 1: Elementarzusammensetzung absolut trockenes Holz (Marutzky 1999)

	C $\frac{kg\ C}{kg\ Bst}$	O $\frac{kg\ O}{kg\ Bst}$	H $\frac{kg\ H}{kg\ Bst}$	N $\frac{kg\ N}{kg\ Bst}$	Minerale $\frac{kg\ Miner.}{kg\ Bst}$	H ₂ O $\frac{kg\ H_2O}{kg\ Bst}$
W ₀	0,5000	0,4300	0,0600	0,0010	0,0090	0,0000

7. ERRECHNUNGSERGEBNISSE

Abb. 5 fasst die wesentlichen Ergebnisse der theoretischen Berechnungen zusammen. Hier ist der Feuerungstechnische Wirkungsgrad für verschiedene Wassergehalte der Holzhackschnitzel (w= 0 %; 10 %; 30 %; 40 %; 50 %; 60 %) über der Abgastemperatur (Rauchgastemperatur) bezogen auf den unteren Heizwert H_i dargestellt. Zusätzlich wurde für jeden Wassergehalt des Brennstoffes der Verbrennungsluftüberschuss zwischen $\lambda = 1$ und $\lambda = 3$ variiert ($\lambda = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$). Bei der modernen, geregelten Holzverbrennung kann der Überschuss an Verbrennungsluft - zur Erzielung einer hohen Effizienz - bis auf $\lambda = 1,5$ heruntergefahren werden. Daher sind die Ergebnisse für einen Luftüberschuss von $\lambda = 1,5$ „gestrichelt hervorgehoben“.

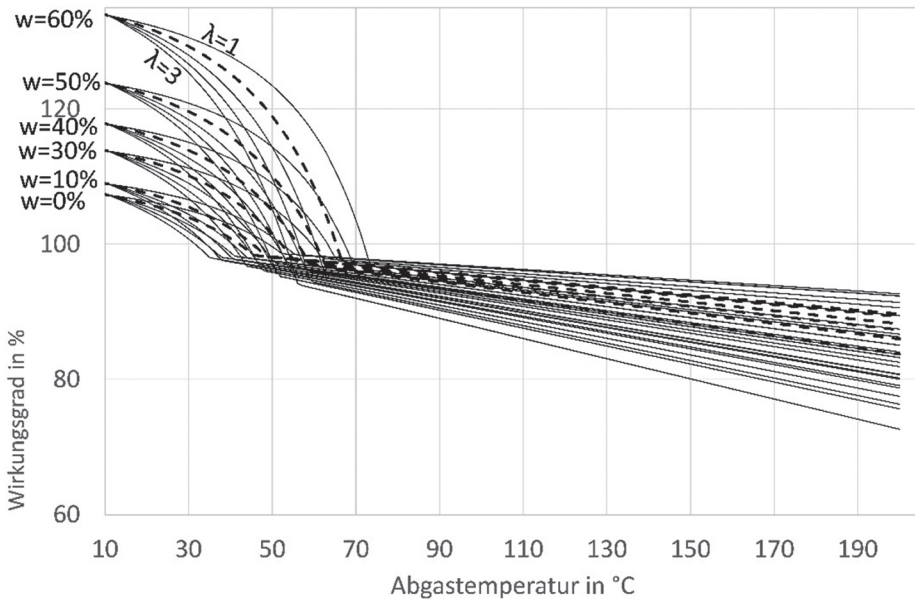


Abb. 5: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad bezogen auf den unteren Heizwert als Funktion der Abgastemperatur

Bei Abgastemperaturen von 180 °C, wie sie in Standardkesseln zur Vermeidung von Kondensation üblicherweise gefahren werden, lassen sich je nach Wassergehalt und Luftüberschuss λ Feuerungstechnische Wirkungsgrade zwischen 75 % und maximal 93 % erzielen. Bei einem verbreiteten Wassergehalt der Holzsplitzel von 40 bis 50 % und einem Luftüberschuss von $\lambda = 1,5$ erhält man einen Feuerungstechnischen Wirkungsgrad in der Größenordnung von ca. 88 %.

Kann das Abgastemperaturniveau abgesenkt werden, erhöht sich der Wirkungsgrad zunächst linear bis zum jeweiligen Taupunkt. Die Kondensation des im Abgas befindlichen Wasserdampfes beginnt nach Unterschreitung des Taupunktes, wobei dieser vom Wassergehalt des Brennstoffes und vom Luftüberschuss abhängt. Bei der Abgaskondensation werden große Mengen an latenter Wärme freigesetzt und an das Heizungswasser übertragen, was sich in der Steigerung des Wirkungsgrades deutlich zeigt.

Abb. 7 stellt auch klar, dass entgegen der oft gelesenen Behauptung der maximale Brennwerteffekt nicht bereits unmittelbar nach dem Unterschreiten des Taupunktes erreicht wird. Vielmehr steigt der Wirkungsgrad mit sinkender Abgastemperatur degressiv an. Eine Abkühlung des Abgases auf Temperaturen im Bereich von 30 °C bis 40 °C scheint hierbei durchaus sinnvoll.

Mit Hilfe dieser Grafik kann nun die mögliche Effizienzsteigerung und damit das Einsparpotential an Holz ermittelt werden. Bei der Verbrennung von Holzsplitzel mit einem Wassergehalt von 50 % und einem Luftüberschuss von $\lambda = 1,5$ kann beispielsweise der Wirkungsgrad von 89 % bei 180 °C Abgastemperatur auf ca. 116 % bei 40 °C Abgastemperatur erhöht werden. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von 30 % (oder 27 %-Punkten) und einer Brennstoffeinsparung von knapp 23 %.

Je höher der Wassergehalt und je geringer der Luftüberschuss, umso größer ist das Einsparpotential. Für trockene Holzpellets (10 % Wassergehalt) kann der Wirkungsgrad von 90 % (bei 180 °C Abgastemperatur, $\lambda = 1,5$) auf maximal 108 % gesteigert werden. Dies entspricht einer maximalen Effizienzsteigerung von 20 % oder einer Brennstoffeinsparung von immerhin gut 16 %. Bei Holzsplitzel mit einem Wassergehalt von 60 % (frisch geerntetes Holz) steigt der Wirkungsgrad von 85 % (180 °C Abgastempe-

ratur, $\lambda = 1,5$) auf maximal 133 % an. Dies entspricht einer maximalen Effizienzsteigerung von über 56 % und ergibt ein maximales Einsparpotential an Brennstoff von über 36 %. Würde die Verbrennung hier mit einem Luftüberschuss von $\lambda = 3$ gefahren, ließe sich der Wirkungsgrad von ca. 75 % auf 133 % steigern, was einer Effizienzsteigerung von 77 % und einer Brennstoffeinsparung von knapp 44 % entspricht.

8. VERGLEICH THEORIE UND PRAXIS

An einer realen Holzhackschnitzel-Anlage mit Brennwerttechnologie, die in einem Nahwärmenetz in Dornbirn, Österreich, installiert ist, konnten vergleichende Messungen durchgeführt werden. Die Anlage mit einer Kesselleistung von 1080 kW verfügt über einen nachgeschalteten Abgaswärmetauscher, der vom Anlagenrücklauf durchströmt wird.

Bei der Verbrennung von relativ trockenen Holzhackschnitzeln (Wassergehalt $w = 37$ %, Luftüberschuss $\lambda = 1,5$; Restsauerstoff in den Abgasen 7 %) sowie einer netzseitigen Rücklauftemperatur vom 41° C konnten die Abgase von 190 °C auf 43 °C abgekühlt werden. Dabei entzog der Wärmetauscher den Abgasen eine zusätzliche Leistung von 240 kW, die sich wie in Abb. 6 dargestellt hälftig aus latenter Kondensationswärme (Kondensatmengenmessung) und hälftig aus sensibler Abgastemperaturreduzierung ergab. Vergleichend ist in Abb. 6 ebenfalls der sensible und latente Wärmegewinn nach der theoretischen Berechnung für diese Randbedingungen dargestellt. Der Kessel hatte bei diesen Bedingungen eine Leistung von 1080 kW und einen feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 87 %. Durch den zugeschalteten Abgaswärmetauscher konnte die Gesamtleistung auf 1.320 kW und der gemessene feuerungstechnische Wirkungsgrad um über 22 % auf 106 % erhöht werden.

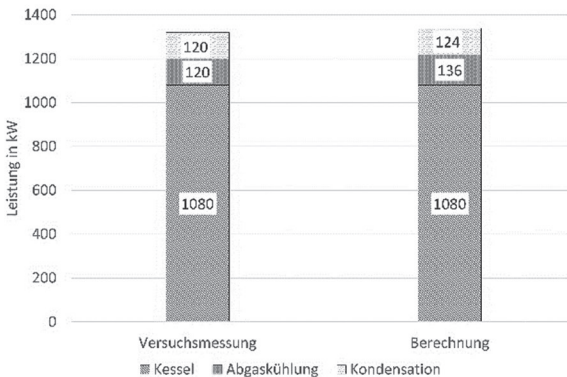


Abb. 6: Vergleich Messung und Berechnung

Der berechnete Wärmegewinn der Abgaskühlung liegt mit 260 kW ca. 8 % über den Messergebnissen. Bezogen auf die Gesamtleistung bzw. Gesamteffizienz der Anlage beläuft sich die Abweichung aber nur auf ca. 1,5 %. Dies kann als eine sehr gute Übereinstimmung von Theorie und Praxis gewertet werden.

9. FAZIT

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Holz als Energieträger einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende liefern kann. Die Begrenztheit der nachhaltig zur Verfügung stehenden Holzmenge und die Schadstoffemissionen bei der Verbrennung fordern aber einen sorgsamen Umgang mit Energieholz.

Durch die konsequente Nutzung der Brennwerttechnologie lassen sich im Bereich der Holzhackschnitzel-Verbrennung in der Praxis realistische Effizienzverbesserungen von 25 % und damit Rohstoffersparungen von 20 % erreichen.

LITERATUR

- C.A.R.M.E.N. E.V. (2020): So viel Heizwert steckt im Holz. <https://www.carmen-ev.de/2020/10/27/so-viel-heizwert-steckt-im-holz/> [Zugriff am: 15.08.2021]
- DIN EN ISO 17225-4 (2014): Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Beuth, <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-17225-4/194926504> [Zugriff am: 06.05.2021]
- Floß A. (2006) Qualitätssicherung bei Heizungsanlagen mit Brennwerttechnik, „Kondi-Check“ - ein neues Verfahren zur Effizienzbewertung. Heizung Lüftung Klimatechnik, Ausgabe: Nr.1-2/2006, Seite 39-41, Springer Business Media Austria GmbH.
- Gammel E. (2008) Heizwert –Brennwert <https://www.gammel.de/de/lexikon/Heizwert---Brennwert/4838> [Zugriff am:05.08.2021]
- Hahn J. (2014) Der Energieinhalt von Holz. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Bayern, Merkblatt 12, <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-12-energiegehalt-holz.pdf> [Zugriff am: 10.08.2021]
- Marutzky R., Seeger K. (1999) Energie aus Holz, DRW-Verlag, 1999, Seite 32.
- Schardt M. (2006) Das Problem mit der Holzfeuchte und dem Wassergehalt. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, LWF aktuell 54, S. 50-51.
- Umweltbundesamt (2020) Primärenergieverbrauch nach Energieträgern <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primarenergieverbrauch#primarenergieverbrauch-nach-energietragern>. [Zugriff am: 04.05.2021].
- Wittkopf S. (2005) Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Forstl. Forschungsberichte Nr. 200, München.

KONTAKTDATEN:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß
Hochschule Biberach
Karlstraße 11
88400 Biberach
Deutschland

Email: floss@hochschule-bc.de

Datengetriebene Modellierung einer Zweibettwirbelschicht-Gaserzeugungsanlage

L. Stanger, M. Kozek, A. Schirrer
TU Wien, Österreich

ABSTRACT: Dual fluidized bed gasification plants can be used for thermo-chemical conversion of biomass to a high-valuable product gas. Applying advanced control concepts offers the opportunity to increase the efficiency of those plants. Model predictive control has been applied successfully to control plants in the process industry. In this paper, the identification of a 100-kW pilot plant at the TU Wien is presented in order to obtain a model that can be used for model predictive control.

1. EINLEITUNG

Der global steigende Bedarf an Energie und die Notwendigkeit zur Reduktion von Treibhausgasen erfordern die Verwendung umweltfreundlicher Energieträger (Gironès et al. 2017). Die thermo-chemische Konversion von Biomasse in Zweibettwirbelschicht-Gaserzeugungsanlagen (engl. „Dual Fluidized Bed“, DFB) bietet die Möglichkeit Wärme, Elektrizität und ein vielseitig verwendbares Produktgas herzustellen. Das Produktgas kann beispielsweise zu synthetischem Erdgas weiterverarbeitet werden (Benedikt et al., 2018). Im industriellen Maßstab wurden DFB-Anlagen bereits in Güssing (Österreich), Oberwart (Österreich), Senden (Deutschland) und Göteborg (Schweden) umgesetzt.

An der TU Wien besteht eine DFB-Pilotanlage (100 kW) mit nachfolgender Methanierung zur Herstellung von Produktgas bzw. synthetischem Erdgas (Benedikt et al. 2018). Aktuell wird der Prozess vom Anlagenfahrer durch manuelle Einstellung der Stellgrößen gesteuert. Es existieren nur untergeordnete Regelkreise, beispielsweise zur Kühlung des Produktgases (Schmalzl 2014). Eine Automatisierung der Anlage durch Implementierung eines modellbasierten Regelungskonzeptes bietet die Möglichkeit zur Effizienzsteigerung der Anlage. Modellprädiktive Regelungen wurden an verfahrenstechnischen Anlagen schon vielfach umgesetzt (Qin & Badgwell 2003). Sie erlauben die optimale Regelung von Mehrgrößensystemen unter Berücksichtigung von Beschränkungen für Stellgrößen, Zuständen und Regelgrößen. Dabei wird ein dynamisches Modell verwendet um den Prozess abzubilden. Die Identifikation eines dynamischen Modells der DFB-Pilotanlage wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

2. PROZESSMODELL

Die Modellierung erfolgt in zwei Schritten: Zuerst werden die physikalischen Zusammenhänge zwischen den zu modellierenden Größen mit Massen- und Energiebilanzen hergestellt. Anschließend erfolgt die Schätzung der darin auftretenden unbekannt Parameter anhand von Messdaten.

2.1 PROZESSBESCHREIBUNG

Die DFB-Anlage besteht aus zwei Wirbelschichtreaktoren: einem Gaserzeugungsreaktor (GR) und einem Verbrennungsreaktor (CR), dargestellt in Abb. 1. Die beiden Reaktoren sind über zwei Siphons, dem Upper-Loop-Seal (ULS) und dem Lower-Loop-Seal (LLS), miteinander verbunden. Dies ermöglicht einerseits eine Zirkulation von Bettmaterial, verhindert andererseits aber einen Gastransport zwischen den beiden Reaktoren.

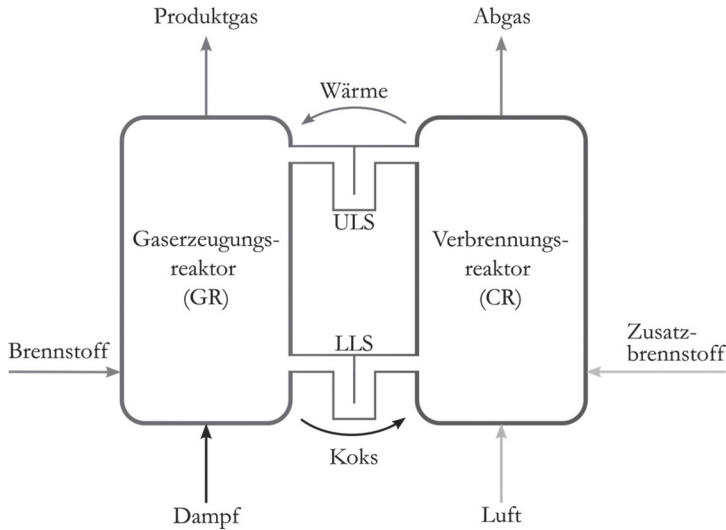


Abb. 1: Prinzip der Zweibettwirbelschicht-Gaserzeugungsanlage.

In den GR wird Brennstoff und ein Gaserzeugungsmittel eingebracht. In dieser Arbeit wird der Prozess mit Holzpellets als Brennstoff und Dampf als Gaserzeugungsmittel behandelt. Durch die hohe Temperatur (750 – 850 °C) im Reaktor wird ein Großteil des Brennstoffs vergast, ein Teil bleibt als Koks zurück. Das Koks wird über das Bettmaterial in den CR transportiert. Hier erfolgt durch Einbringung von Luft in drei Ebenen (Primärluft, Sekundärluft, Tertiärluft) die Verbrennung des Koks aus dem GR unter Zuhilfenahme eines Zusatzbrennstoffes. Diese Verbrennung liefert die nötige Energie für die überwiegend endothermen Vergasungsreaktionen im GR. Der Wärmetransport vom CR in den GR erfolgt über das Bettmaterial. Ein Produktgas, überwiegend bestehend aus H_2 , CO , CO_2 , CH_4 und H_2O verlässt den GR, das Abgas den Verbrennungsreaktor.

Ziel der Modellierung ist die Identifikation eines dynamischen Modells, das später für den Entwurf der Regelung sowie für Simulationen verwendet werden kann. Dafür sollen die Regelgrößen (Ausgänge) des Prozesses als Funktion der Stell- und Störgrößen (Eingänge) abgebildet werden. Die Eingänge bilden der Brennstoffmassenstrom (\dot{m}_{fuel}), die Dampfmenge in den GR ($\dot{m}_{steam,GR}$), die Dampfmenge in den ULS ($\dot{m}_{steam,ULS}$), die Dampfmenge in den LLS ($\dot{m}_{steam,LLS}$), der Massenstrom an Zusatzbrennstoff (\dot{m}_{oil}) und die Luftmenge in drei Ebenen ($\dot{m}_{air,p}$, $\dot{m}_{air,s}$ und $\dot{m}_{air,t}$). Modelliert werden die Ausgänge Produktgasmassenstrom (\dot{m}_{PG}), Abgasmassenstrom (\dot{m}_{FG}), Gaserzeugungstemperatur (T_{GR}) und Verbrennungstemperatur (T_{CR}).

2.2 MODELLIERUNG: MASSENBIlanz ZWEIBETTWRIBELSCHICHT-GASERZEUGUNGSANLAGE

Um den Produktgasmassenstrom, der die Anlage verlässt (\dot{m}_{PG}), zu modellieren, wird eine Massenbilanz für die gesamte DFB-Anlage gebildet. Im stationären Betrieb gilt für den GR die Massenbilanz

$$\begin{aligned} \dot{m}_{PG} = & (1 - c_{H_2O})(1 - c_{fuel,CR})\dot{m}_{fuel} + c_{H_2O}\dot{m}_{fuel} \\ & + \dot{m}_{steam,GR} + c_{ULS}\dot{m}_{steam,ULS} + c_{LLS}\dot{m}_{steam,LLS} \end{aligned} \quad (1)$$

mit dem Wassergehalt im Brennstoff $c_{\text{H}_2\text{O}}$. Die Koeffizienten $c_{\text{fuel,CR}}$, c_{ULS} und c_{LLS} beschreiben die Aufteilung von trockenem Brennstoff, Dampf aus dem ULS und Dampf aus dem LLS zwischen dem GR und dem CR. Der Bettmaterialumlauf ist nicht in der Massenbilanz enthalten, da das Bettmaterial ständig zwischen den beiden Reaktoren zirkuliert und somit den Produktgasmassenstrom nicht beeinflusst.

Für den CR gilt die stationäre Massenbilanz

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{FG}} = & (1 - c_{\text{H}_2\text{O}})c_{\text{fuel,CR}}\dot{m}_{\text{fuel}} + \dot{m}_{\text{oil}} + (1 - c_{\text{ULS}})\dot{m}_{\text{steam,ULS}} \\ & + (1 - c_{\text{LLS}})\dot{m}_{\text{steam,LLS}} + \dot{m}_{\text{air,p}} + \dot{m}_{\text{air,s}} + \dot{m}_{\text{air,t}}, \end{aligned} \quad (2)$$

mit dem Abgasmassenstrom \dot{m}_{FG} .

Die obigen Massenbilanzen gelten für stationäre Punkte. Wird beispielsweise der Brennstoffeintrag sprunghaft erhöht, führt dies jedoch nicht unmittelbar zu einem sprunghaften Anstieg des Produktgasmassenstromes. Um dieses dynamische Verhalten im Modell abbilden zu können, wird für die Massenströme \dot{m}_{PG} und \dot{m}_{FG} jeweils ein dynamischer Ansatz gewählt:

$$\frac{d}{dt} \dot{m}_{\text{PG}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{PG}}} (-\dot{m}_{\text{PG}}(t) + \phi_{\text{PG}}(\mathbf{u}(t))) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{m}_{\text{FG}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{AG}}} (-\dot{m}_{\text{FG}}(t) + \phi_{\text{FG}}(\mathbf{u}(t))) \quad (4)$$

Dabei sind ϕ_{PG} und ϕ_{FG} jeweils Funktionen der Eingänge und entsprechen den rechten Seiten der Gleichungen (1) und (2). Die Zeitkonstanten τ_{PG} und τ_{FG} werden mittels Messdaten geschätzt.

2.3 MODELLIERUNG: ENERGIEBILANZ GASERZEUGUNGSREAKTOR

Eine Energiebilanz des Gaserzeugungsreaktors

$$C_{\text{GR}} \frac{dT_{\text{GR}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{bed}} - \dot{H}_{\text{fuel}} + \dot{H}_{\text{steam}} - \dot{Q}_{\text{loss,GR}} - \dot{Q}_{\text{PG}}, \quad (5)$$

mit der Wärmekapazität des Gaserzeugungsreaktors C_{GR} , wird verwendet, um die Vergasungstemperatur T_{GR} zu modellieren. Der Wärmestrom \dot{Q}_{bed} beschreibt den Nettowärmetransport vom CR in den GR:

$$\dot{Q}_{\text{bed}} = c_{\text{p,bed}}(T_{\text{CR}} - T_{\text{GR}})\dot{m}_{\text{bed}} \quad (6)$$

mit der Wärmekapazität des Bettmaterials $c_{\text{p,bed}}$ und dem Bettmaterialmassenstrom \dot{m}_{bed} . Es wird angenommen, dass der Massenstrom an Bettmaterial in den GR dem Massenstrom aus dem GR entspricht. In Fuchs et al. 2018 wurden Untersuchungen zur Berechnung des Bettmaterialmassenstroms durchgeführt. So kann dieser näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\dot{m}_{\text{bed}} = \frac{\Delta p_{\text{CR}} \dot{V}_{\text{CR}}}{\Delta h_{\text{CR}g}} R_{\text{corr}}. \quad (7)$$

Die Druckdifferenz im oberen Teil des CR, Δp_{CR} , wird zwischen zwei Punkten im Abstand von Δh_{CR} gemessen. \dot{V}_{CR} beschreibt den Volumenstrom durch den CR, g die Gravitationskonstante und R_{corr} einen Korrekturfaktor, der ebenfalls in Fuchs et al. 2018 empirisch ermittelt wurde.

Die notwendige Energie für die überwiegend endothermen Vergasungsreaktionen im GR wird durch ein Produkt aus trockener Brennstoffmenge und einer Reaktionskonstante c_{react} angenähert:

$$\dot{H}_{\text{fuel}} = c_{\text{react}} \dot{m}_{\text{fuel}} (1 - c_{\text{H}_2\text{O}}) (1 - c_{\text{fuel,CR}}) \quad (8)$$

Der Enthalpieeintrag durch die Dampfmenge in den GR ergibt sich aus dem Produkt aus spezifischer Enthalpie, die von der Dampftemperatur abhängt, und dem Dampfmassenstrom in den GR:

$$\dot{H}_{\text{steam}} = h_{\text{steam}} \dot{m}_{\text{steam,GR}} \quad (9)$$

Der Wärmeverlust des GR wird angenähert durch

$$\dot{Q}_{\text{loss,GR}} = c_{\text{loss,GR}} T_{\text{GR}} \quad (10)$$

die über das Produktgas abgegebene Wärme durch

$$\dot{Q}_{\text{PG}} = c_{\text{p,PG}} T_{\text{GR}} \dot{m}_{\text{PG}} \quad (11)$$

2.4 MODELLIERUNG: ENERGIEBILANZ VERBRENNUNGSREAKTOR

Zur Modellierung der Verbrennungstemperatur wird eine Energiebilanz des CR gebildet:

$$C_{\text{CR}} \frac{dT_{\text{CR}}}{dt} = -\dot{Q}_{\text{bed}} + P_{\text{comb,fuel}} + P_{\text{comb,oil}} + \dot{H}_{\text{steam}} + \dot{H}_{\text{air}} - \dot{Q}_{\text{loss,CR}} - \dot{Q}_{\text{FG}} \quad (12)$$

mit der Wärmekapazität des CR C_{CR} und \dot{Q}_{bed} aus (6). Die durch Verbrennung zugeführte Leistung wird durch

$$P_{\text{comb,fuel}} = H_{\text{char}} \dot{m}_{\text{fuel}} (1 - c_{\text{H}_2\text{O}}) c_{\text{fuel,CR}} \quad (13)$$

und

$$P_{\text{comb,oil}} = H_{\text{oil}} \dot{m}_{\text{oil}} \quad (14)$$

berücksichtigt, mit den Heizwerten von Koks H_{char} und des zugeführten Öls H_{oil} . Der Enthalpiestrom durch eingebrachten Dampf wird analog zum GR berechnet:

$$\dot{H}_{\text{steam}} = h_{\text{steam}} \dot{m}_{\text{steam,CR}} \quad (15)$$

Ebenso wird die durch Luftströme eingebrachte Enthalpie

$$\dot{H}_{\text{air}} = c_{p,\text{air}} \dot{m}_{\text{air}} T_{\text{air}} \quad (16)$$

berücksichtigt. Die abgegebenen Wärmeströme durch Verluste ($\dot{Q}_{\text{loss,CR}}$) und das Abgas (\dot{Q}_{FG}) werden durch

$$\dot{Q}_{\text{loss,CR}} = c_{\text{loss,CR}} T_{\text{CR}} \quad (17)$$

und

$$\dot{Q}_{\text{FG}} = c_{p,\text{FG}} T_{\text{CR}} \dot{m}_{\text{FG}} \quad (18)$$

beschrieben, mit einer Konstante $c_{\text{loss,CR}}$ und der spezifischen Wärmekapazität des Abgases $c_{p,\text{FG}}$, die als konstant angenommen wird.

3. PARAMETERSCHÄTZUNG

3.1 PROBLEMSTELLUNG UND OPTIMIERUNG

Das dynamische Verhalten der Ausgänge $y = [\dot{m}_{\text{PG}}, \dot{m}_{\text{FG}}, T_{\text{GR}}, T_{\text{CR}}]^T$ wurde im Abschnitt 2 mit jeweils einer Differenzialgleichung erster Ordnung beschrieben. Diese Differentialgleichungen werden nun zu einem Differentialgleichungssystem zusammengefasst:

$$\dot{y} = f(y, u) \quad (19)$$

Das Differentialgleichungssystem enthält die als bekannt angenommenen Parameter $\theta^* = [c_{\text{H}_2\text{O}}, \rho_{\text{oil}}, \rho_{\text{air}}, \rho_{\text{steam}}, c_{p,\text{bed}}, c_{p,\text{air}}, c_{p,\text{PG}}, c_{p,\text{FG}}]^T$ sowie die zunächst unbekannt Parameter $\theta = [\tau_{\text{PG}}, \tau_{\text{AG}}, c_{\text{char}}, c_{\text{ULS}}, c_{\text{LLS}}, C_{\text{GR}}, C_{\text{CR}}, c_{\text{react}}, c_{\text{loss,GR}}, c_{\text{loss,GR}}, H_p, H_{\text{oil}}]^T$.

Zur Schätzung der unbekannt Parameter werden Messdaten der Pilotanlage verwendet: Die zu schätzenden Parameter θ werden so angepasst, dass der Modellausgang \hat{y} möglichst dem gemessenen Ausgang y entspricht. Dazu wird die Kostenfunktion

$$V(\hat{\theta}) = \sum_{k=1}^N (\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k))^T (\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)) \quad (20)$$

minimiert. Dabei beschreibt k den Zeitschritt, N entspricht der Anzahl an Zeitschritten der als Identifikationsdaten ausgewählten Messreihe. Die Schätzung der Parameter wurde mit der Matlab System Identification Toolbox durchgeführt (The MathWorks 2021; Ljung 1999).

3.2 PARAMETERSENSITIVITÄTEN

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf den Modellausgang zu untersuchen, kann die Parametersensitivität $\xi_i = dy/d\theta_i$ des Parameters θ_i betrachtet werden. Umgekehrt gibt die Parametersensitivität Aufschluss darüber, wie präzise eine Schätzung des jeweiligen Parameters mit den verfügbaren Messdaten möglich ist.

Ob die einzelnen Parameter unabhängig voneinander identifizierbar sind, kann durch eine Singulärwertzerlegung der Parametersensitivitätsmatrix untersucht werden (Ritzberger et al. 2021). Dabei zeigt sich in dieser Anwendung, dass eine exakte Identifikation der unbekannt Parameter nur schwer möglich ist: Dadurch, dass die Anlage typischerweise auf stationären Punkten betrieben wird, sind die Parametersensitivitäten linear stark voneinander abhängig, was eine genaue Parameterschätzung nicht möglich macht. Daher werden in Zukunft weitere, spezifisch gestaltete Versuche durchgeführt, bei denen der Prozess durch veränderliche Stellgrößen angeregt wird. Auch zur Versuchsplanung ist eine Betrachtung der Parametersensitivitäten sehr hilfreich, da dann die Versuche so geplant werden können, dass mit den generierten Messdaten die im Modell enthaltenen Parameter bestmöglich identifiziert werden können (Franceschini & Macchietto 2008).

4. ERGEBNISSE

Um das identifizierte Modell zu validieren, wird eine Simulation durchgeführt: Anhand gemessener Eingänge werden die Modellausgänge berechnet. Diese werden mit den gemessenen Ausgängen verglichen (Abb. 2).

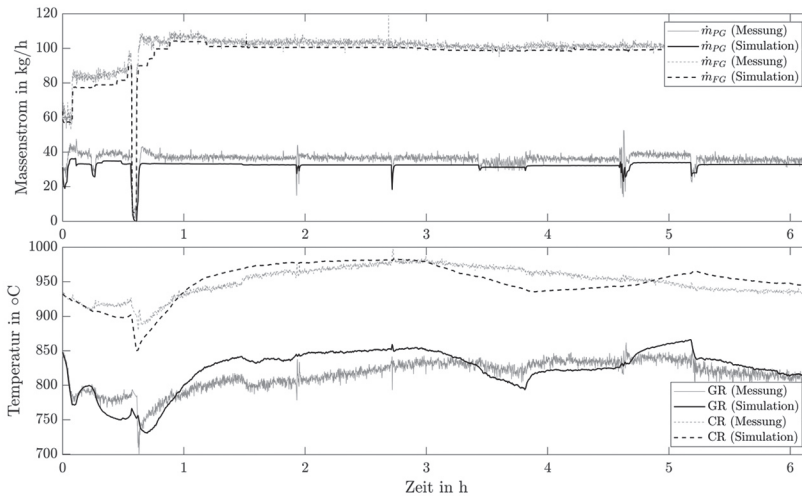


Abb. 2: Gegenüberstellung von Modellausgängen und gemessenen Ausgängen für Produktgasmassenstrom, Abgasmassenstrom, Temperatur im GR und Temperatur im CR.

Produktgas- und Abgasmassenstrom können vom Modell bereits gut abgebildet werden. Eine stationäre Abweichung zwischen Modellausgang und Messung ist zu erkennen. Diese kann allerdings auch aufgrund von Messungenauigkeiten bestehen: Die Messung der Massenströme erfolgt an der Pilotanlage mit einer Druckmessblende. Tatsächlich wird der Differenzdruck an dieser gemessen, im Anschluss wird der Durchfluss berechnet. Für die Berechnung ist unter anderem Kenntnis des Wassergehaltes im Produktgas bzw. im Abgas notwendig. Dieser wird allerdings nicht online gemessen und ist somit nicht für jeden Zeitpunkt des Versuchs bekannt, was ebenso die konstante Abweichung erklären kann.

Bei der Simulation der Temperaturen in den Reaktoren sind größere Abweichungen zu erkennen. In den Temperaturmodellen treten mehrere unbekannte Parameter auf. Diese sind mit den verfügbaren Messdatensätzen nur schwer zu schätzen, da die Versuchsanlage überwiegend in stationären Punkten betrieben wird und somit wenig Variationen in den Eingängen vorhanden ist.

5. FAZIT

Die Modellierung einer Zweibettwirbelschicht-Gaserzeugungsanlage wurde präsentiert. Qualitativ kann das Modell die Ausgänge, speziell die Massenströme, gut nachbilden. Um die Modellqualität weiter zu erhöhen, müssen weitere Versuche durchgeführt werden, bei denen der Prozess durch transiente Veränderung der Stellgrößen angeregt wird und somit die Parameter besser identifiziert werden können.

LITERATUR

- Benedikt F., Schmid J., Fuchs J., Mauerhofer A., Müller S. & Hofbauer H. (2018) Fuel flexible gasification with an advanced 100 kW dual fluidized bed steam gasification pilot plant. *Energy*, 164, 329-343.
- Franceschini G. & Macchietto S. (2008) Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art. *Chemical Engineering Science*, 63(19), 4846-4872.
- Fuchs J., Schmid J., Benedikt F., Mauerhofer A., Müller S. & Hofbauer H. (2018) A general method for the determination of the entrainment in fluidized beds. *The International Journal of Multiphysics*, 12(4).
- Gironès V., Moret S., Peduzzi E., Nasato M. & Maréchal F. (2017) Optimal use of biomass in large-scale energy systems: Insights for energy policy. *Energy*, 137, 789-797.
- Ljung L. (1999) *System identification: theory for the user*. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Qin S. & Badgwell T. (2003) A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733-764.
- Ritzberger D., Höflinger J., Du Z., Hametner C. & Jakubek S. (2021) Data-driven parameterization of polymer electrolyte membrane fuel cell models via simultaneous local linear structured state space identification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(21), 11878-11893.
- Schmalzl M. (2014) Implementierung der MSR-Technik einer 100 kW DUAL FLUID Versuchsanlage zur Vergasung von Festbrennstoffen.
- The MathWorks I. (2021) System Identification Toolbox. Von <https://de.mathworks.com/products/sysid.html> abgerufen

KONTAKTDATEN:

Lukas Stanger
TU Wien
Getreidemarkt 9/E325
1060 Wien, Austria
Email: lukas.stanger@tuwien.ac.at

Session 3a

Green Energy Lab – Sektorkopplung

Modellierungstool für den Einsatz von Warmwasserspeichern als Flexibilitäten

Gnam / FH Burgenland GmbH / AT

Schindler, Jasek, Pfeiffer, Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT

Low-Cost-Technologien zur Einbindung kleiner el. Wärmespeicher in VKs

Rabensteiner / 4ward Energy Research GmbH / AT

Erneuerbar Heizen und Kühlen mit „Energie aus Abwasser“ am Beispiel Zentrale Wien Kanal

Wiedemann / Rabmer GreenTech GmbH / AT

Gennari / Fachhochschule Oberösterreich / AT

Koller / Rabmer Bau & Umwelttechnik GmbH / AT

Innovatives Modernisierungskonzept zur Effizienzsteigerungen im Biomasse-Heizwerk Saalfelden

Bärnthaler, Theissing / FH-Joanneum / AT

Herbst, Seifner / Salzburg AG / AT

Kelz / AEE INTEC / AT

energie
BURGENLAND

Hast du Platz auf deinem Dach?

Dann hol dir SonnenMax
oder SonnenMarie



Nähere Informationen auf weiterdenker.at

Deine
PV-Anlage
ab 45 Euro
im Monat!

Modellierungstool für den Einsatz von Warmwasserspeichern als Flexibilitäten

L. Gnam

Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

M. Schindler, P. Jasek, C. Pfeiffer, M. Puchegger

Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: For a successful transformation of the existing energy system to a sustainable and green system, the ever-increasing use of renewable energy conversion is inevitable. In the electricity sector in particular, the use of wind turbines and photovoltaic systems offers enormous potential for replacing conventional or fossil energy sources. One of the greatest challenges of the two aforementioned power generation technologies lies in their often extremely fluctuating generation, where generation and demand do not always coincide resulting in a high demand for so-called flexibilities, such as energy storage systems. However, since electricity storage systems pose challenges in terms of capacity, performance and cost, it is necessary to use other storage technologies in order to obtain both a technical and an economically acceptable solution to the flexibility problem. Here, especially the sector coupling option “thermal storage” plays a central role, which can provide the necessary flexibilities for an energy system. Local heating networks and heating centers in multi-story residential buildings are usually coupled with on-site thermal (and electrical) production. Heat pumps are sometimes used to couple the electricity grid with the heating grid and thereby store excess electricity in the form of heat. Here, heat pumps are ideally suited to make targeted use of the fluctuating generation of renewable electricity and to use or store it as heat. Some of the challenges for a successful coupling of electricity and heat grids lie on the one hand in the technical design of the heat pumps and on the other hand in the way exactly these systems are to be integrated into existing or new grids. Therefore, this work presents a flexibly applicable and modular modeling and simulation framework for the coupling of power and heat grids. It is based on a mixed-integer linear optimization model for power and heat networks. Due to the flexible design, different types of storage with variable sizes can be considered. Since besides a technically optimal operation also the economic efficiency is of great importance, a main aspect of the framework is the calculation of a technically and economically efficient schedule of heat pumps and storage units as well as an analysis of optimal investment options for an adaptation of existing systems. Using the example of an existing electricity and heat network in Burgenland, this paper shows how an optimal storage of electricity in heat storage systems leads to an increase of the share of renewable energy in the system and at the same time to an economic additional revenue.

1. EINLEITUNG

Damit die Energiewende weiter vorangetrieben wird, ist nicht nur die Verfolgung der ambitionierten Ausbauziele für erneuerbare Energien notwendig, sondern müssen auch die damit einhergehenden Herausforderungen betrachtet werden. Durch den hohen Anteil fluktuierend Erzeugender ist einerseits die Netzstabilität ein Thema aber andererseits auch die temporale Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch erneuerbarer Energien. Im Burgenland, dem östlichsten Bundesland Österreichs, gibt es eine große Anzahl an Windenergieanlagen. Einher mit der hohen Erzeugungsmenge geht das Problem der Verteilung und Speicherung, vor allem in Zeiten in denen die Erzeugung größer als der Verbrauch ist. Daher ist es notwendig Ansätze zu entwickeln um die lokal erzeugte Windkraft speichern und besser nutzen zu können. Hierzu wurde das Projekt „Heat water storage pooling“ ins Leben gerufen, welches

zum Ziel hat einen Pooling-Ansatz für thermische Speicher zu entwickeln und als Flexibilität zu nutzen (Klima- und Energiefond 2019). Bevor jedoch Ansätze in einer Demonstration verwirklicht werden können, sind Simulationsstudien notwendig um die erforderlichen Regelalgorithmen zu entwickeln und zu testen. Daher verfolgt diese Arbeit das Ziel ein flexibles Modellierungstool zu entwickeln, um die oben genannten Algorithmen designen und evaluieren zu können.

2. MODELLIERUNGSFRAMEWORK

Ziel des objekt- und komponenten-orientierten flexiblen Modellierungstools ist ein hoher Wiederverwendungsgrad sowie eine Vereinfachung der Modellierungsarbeit im Team. Letzteres ergibt sich vor allem dadurch, dass für einen bestimmten Use Case bereits vorhandene Komponenten verwendet werden können, während zum Beispiel parallel dazu an der Verfeinerung der Komponentenmodellierung gearbeitet werden kann. Basis für das Modellierungstool ist das Python-Framework Pyomo (Bynum et al. 2021). Pyomo ist ein quelloffenes Softwarepaket zur Modellierung und Lösung von mathematischen Optimierungsproblemen, wie (gemischt-ganzzahlig) linearer oder quadratischer Optimierung (Kallrath 2013).

In den folgenden Abschnitten werden die momentan vorhandenen Komponenten vorgestellt und erklärt, wie sie zur Modellierung eines Energiesystems verwendet werden können.

2.1 BIOMASSEHEIZWERK

Das Modell des Biomasseheizwerks (BMHWs) beinhaltet die thermische Leistung $P_{th,BMHW}(t)$ und eine binäre Zustandsvariable $on_{BMHW}(t)$ als Entscheidungsvariablen im mathematischen Modell. Alle weiteren Größen werden als Parameter definiert und in den dazugehörigen Nebenbedingungen verwendet. Dazu gehören die minimale und maximale Leistung, $P_{th,BMHW}^{min}(t)$ und $P_{th,BMHW}^{max}(t)$, welche die Leistungsgrenzen definieren. Zusätzlich beschränkt ein maximaler Leistungsgradient die pro Zeiteinheit mögliche Änderung der thermischen Leistung. Das Modell des BMHW beinhaltet prozessbedingt auch minimale Lauf- und Stillstandszeiten. Im Rahmen des Modellierungstools besteht auch die Möglichkeit den Betrieb des BMHWs mit einem Rauchgaskondensator zu koppeln (siehe Abschnitt 2.1.4). Da die Zielfunktion im Modellierungstool die Kosten des abgebildeten Systems minimiert, wird vom Tool automatisch der in Gleichung (1) definierte Beitrag berücksichtigt, wobei η_{BMHW} die Effizienz des BMHWs und p_{BM} den angenommenen Preis der Biomasse darstellen.

$$\frac{P_{th,BMHW}(t)}{\eta_{BMHW}} \cdot p_{BMHW} \quad (1)$$

2.2 BOILER

Die Boiler-Komponente stellt eine simple Beschreibung eines Elektroboilers dar. Die produzierte thermische Leistung $\dot{Q}_{th,boil}(t)$ zum Zeitpunkt t wird bestimmt durch Gleichung (2).

$$\dot{Q}_{th,boil}(t) = P_{el,boil}(t) \cdot \eta_{boil} \quad (2)$$

Hier beschreibt $P_{el,boil}(t)$ die elektrische Leistung zum Zeitpunkt t , η_{boil} den Wirkungsgrad des Boilers.

2.3 ELEKTROLYSEUR

Der Elektrolyseur liefert Wasserstoff abhängig von der elektrischen Leistung $P_{el,EL}(t)$ und seinem Wirkungsgrad η_{EL} gemäß Gleichung (3)

$$F_{H_2}(t) = P_{el,EL}(t) \cdot \eta_{EL} \quad (3)$$

Mittels einer binären Zustandsvariablen $on_{el}(t)$ wird die elektrische Leistungsaufnahme nach oben hin begrenzt ($P_{el,EL}^{max}$) und gleichzeitig auch der Status des Elektrolyseurs modelliert (siehe Gleichung (4)).

$$P_{el,EL}(t) \leq on_{EL}(t) \cdot P_{el,EL}^{max} \quad (4)$$

2.4 RAUCHGASKONDENSATOR

Der Rauchgaskondensator kann nur in Kombination mit dem BMHW betrieben werden und nutzt die Abwärme des BMHWs zur Wärmebereitstellung. Dabei wird die Effizienz dieses Prozesses über den Wirkungsgrad η_{RG} , wie in Gleichung (5) definiert.

$$P_{th,RG}(t) = P_{th,BMHW}(t) \cdot \eta_{RG} \quad (5)$$

2.5 BRENNSTOFFZELLE

Die Brennstoffzelle kann vorhandenen Wasserstoff mit einer Effizienz von η_{BZ} Rückverstromen und dadurch elektrische Energie bereitstellen (Gleichung (6)).

$$P_{el,BZ}(t) = Q_{H_2}(t) \cdot \eta_{BZ} \quad (6)$$

2.6 GASKESSEL

Da der Gaskessel in unseren Modellen als Backup für Zeiten fungiert in denen der Wärmebedarf nicht über die standardmäßig verwendeten Erzeuger (z.B. Biomassekessel, Wärmepumpe, Brennstoffzelle), wird hier ein relativ simples Modell formuliert, welches die thermische Leistung $P_{th,GK}(t)$ bis hin zu einem Maximum $P_{max,GK}$ bereitstellt. Um die Verluste ins Modell zu integrieren, wird in der Zielfunktion die Effizienz η_{GK} über Gleichung (7) berücksichtigt, wobei p_{GK} den angenommenen Gaspreis darstellt.

$$\frac{P_{th,GK}(t)}{\eta_{gk}} \cdot p_{GK} \quad (7)$$

2.7 NETZKOMPONENTEN

Das Simulationsframework enthält auch eine Komponente zur Abbildung der Einspeisung und des Bezuges von Energie aus dem übergeordneten Netz. Die jeweilige elektrische Leistung für die Einspeisung $P_{el,IN}(t)$ und den Bezug aus dem Netz $P_{el,OUT}(t)$ werden in der Zielfunktion noch mit den vom Benutzer zu hinterlegenden Preisen $p_{el,IN}$ und $p_{el,OUT}$ multipliziert um die Kosten korrekt abzubilden.

2.8 WÄRMEPUMPE

Da die Wärmebereitstellung einer Wärmepumpe von der aufgewendeten elektrischen Energie $P_{el,WP}(t)$ und einem temperaturabhängigen „Coefficient of Performance“ (COP)-Wert $COP_{WP}(t)$ abhängt, ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang (Gleichung (7))

$$\dot{Q}_{th,WP}(t) = P_{el,WP}(t) \cdot COP_{WP}(T) \quad (8)$$

Um diese Gleichung zu linearisieren werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Einerseits besteht die Möglichkeit für Ganzjahressimulationen den COP-Wert auf Basis der vorhandenen Temperaturzeitreihe vorab zu berechnen, oder andererseits das Kennlinienfeld aus dem Datenblatt als stückweise lineare Funktion zu hinterlegen. Dadurch können auch nichtlineare multivariate Zusammenhänge näherungsweise im Modell abgebildet werden.

2.9 SPEICHER

Aufgrund der momentan unterschiedlichen Speichertechnologien, die in Energiesystemen zur Anwendung kommen, wie etwa thermische oder elektrische Speicher sowie Wasserstoffspeicher, wurde für die Implementierung im Modellierungstool eine allgemeine Herangehensweise gewählt. Es sind obere und untere Grenzen für den maximalen und minimalen Ladezustand (SOC_{max} und SOC_{min}) sowie Limits für die Lade- und Entladeleistungen im Modell definierbar ($SOC_{max,lade}$ und $SOC_{max,entlade}$). Der Ladezustand $SOC[t]$ ergibt sich dann folgendermaßen (Gleichung (8)):

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + SOC_{lade}(t) - SOC_{entlade}(t) - SOC_{verlust}. \quad (9)$$

Hier beschreibt $SOC_{lade}(t)$ die Ladeleistung und $SOC_{entlade}(t)$ die Entladeleistung zum Zeitpunkt t . Für $t = 0$ wird ein vorher zu definierender Startwert angenommen. $SOC_{verlust}$ bezeichnet die Speicher-verluste und kann optional je nach Speichertechnologie noch extra implementiert werden.

2.10 SOLVER-KLASSE

Basierend auf den in den einzelnen Komponenten hinterlegten Betriebs- oder Investitionskosten, sowie den gesetzten Parametern wird innerhalb dieser speziellen Klasse die Zielfunktion generiert, welche als Minimierungsproblem darauf abzielt die Kosten des Systems zu minimieren. Innerhalb dieser Klasse sind auch Funktionen enthalten, welche die Optimierungsergebnisse für eine nachfolgende Auswertung speichern oder auch ausgewählte Modellvariablen oder –parameter in Bilddateien plotten können.

2.11 NEBENBEDINGUNGEN

Die oben dargestellten Komponenten, wie BMHW oder Wärmepumpe, können zwar die Basis für die zu optimierende Zielfunktion darstellen, ihr genaues Zusammenspiel ist aber dadurch noch nicht definiert. Daher müssen für einen konkreten Anwendungsfall nur noch Nebenbedingungen definiert werden, die zum Beispiel angeben, dass Wärmepumpen ihre elektrische Energie nur aus Wind- oder Photovoltaikanlagen beziehen können. Die hierfür notwendigen Erzeugungsprofile für Wind oder Photovoltaik können entweder aus Prognosen oder historischen Zeitreihen stammen und ins Modell eingelesen werden.

3. BEISPIEL

In diesem Abschnitt wird gezeigt wie mit dem beschriebenen Modellierungsframework ein beispielhaftes Energiesystem modelliert und optimiert wurde. Abb. 1 gibt einen Überblick über das betrachtete System und seine Komponenten. Es enthält eine von einem Windpark gespeiste Wärmepumpe, ein Biomassekraftwerk mit Rauchgaskondensator und einen Gaskessel, welche alle thermische Energie in einen Speicher laden können. Dieser bedient dann die Nachfrage im Fernwärmenetz.

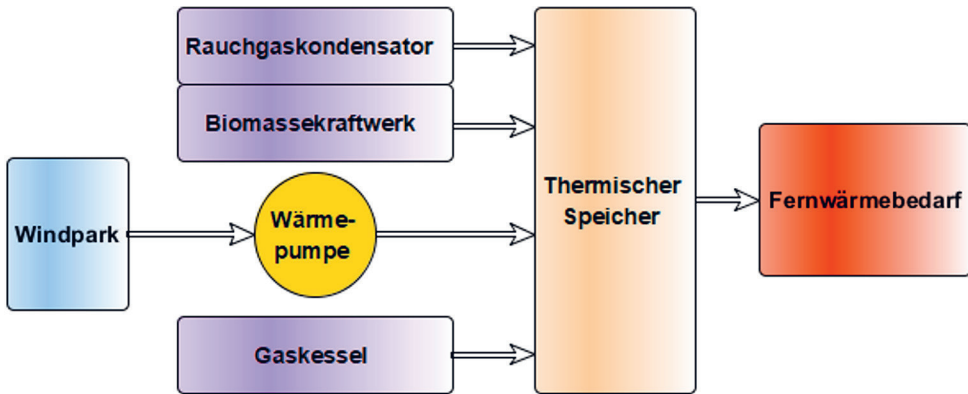


Abb. 1: Übersicht über das beispielhafte Energiesystem.

Der Windpark bzw. seine Erzeugungszeitreihe und der Fernwärmebedarf werden als fixe Zeitreihen in das Modell integriert. Um in der Zielfunktion auch Erlöse für den Verkauf von Windenergie abbilden zu können, wird ebenso eine Zeitreihe mit Preisen hinterlegt (EXAA 2021). Die weiteren Parameterwerte für die inkludierten Komponenten sind in Tab. 1 beschrieben. Das beispielhafte Energiesystem verfügt außerdem über die Besonderheit, dass es zwei verschiedene Betriebsmodi abbildet: einen Sommer- und einen Wintermodus. Im Sommermodus wird das BMHW nicht verwendet und die COP-Werte der Wärmepumpe, folglich auch ihre bereitgestellte Wärmeleistung, sind höher als im Wintermodus (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Der Grund dafür ist, dass eine Aufsplittung der linearen Näherung für den COP-Wert in Sommer- und Wintermodus eine genauere Darstellung der Abhängigkeiten für die COP-Berechnung liefert.

Tab. 1: Angenommene Parameterwerte für das beispielhafte Energiesystem.

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
$P_{max,BMHW}$	2600 kW	η_{BMHW}	0.90	η_{RG}	0.27
$P_{min,BMHW}$	520 kW	p_{BM}	4 ct/kWh	η_{GK}	0.93
p_{GK}	15 ct/kWh	$P_{max,GK}$	3900 kW	SOC_{max}	10.000 kWh
$SOC_{max,entlade}$	10.000 kWh	$SOC_{max,lade}$	10.000 kWh		

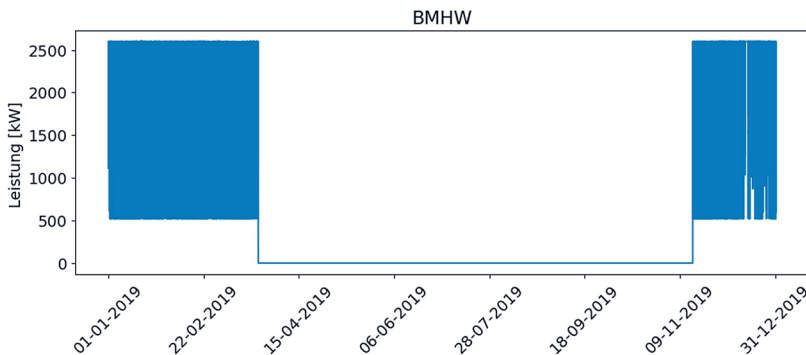


Abb. 2: Thermische Leistung des BMHWs in einem Betriebsjahr.

Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der benötigten Wärme aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann. Für den Fall, dass wenig bis keine Windkraft vorhanden und der thermische Speicher vollständig entladen ist, gibt es noch den Gaskessel als Backuplösung. Dessen Einsatz zeigt sich vor allem im Bereich der Übergangszeiten vom Winter- in den Sommermodus und umgekehrt. Dies ergibt sich beispielsweise im Herbst aus dem immer weiter ansteigenden Wärmebedarf, und der immer weiter abnehmenden Leistung der Wärmepumpen durch den geringer werdenden COP-Wert mit sinkender Quelltemperatur (hier Luft).

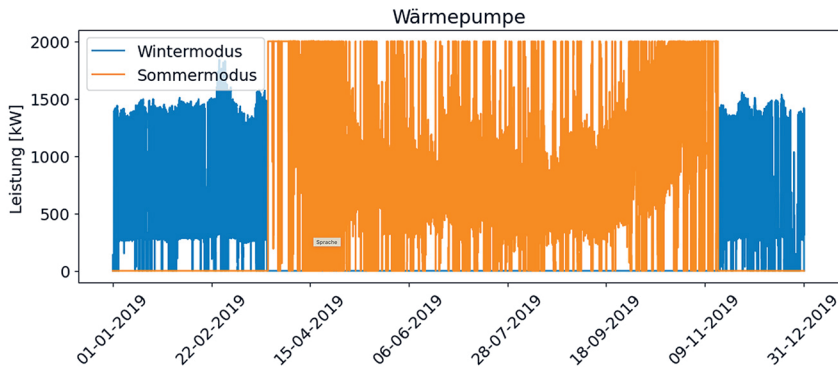


Abb. 3: Thermische Leistung der Wärmepumpe in einem Betriebsjahr.

4. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein modulares Modellierungsframework auf Basis eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsansatzes vorgestellt, welches vor allem auf die Einbindung von Flexibilitäten in neue und bestehende Energiesysteme abzielt. Anhand eines beispielhaften Energiesystems wurde die einfache Anwendung auf Modellfälle gezeigt und wie die Einbindung erneuerbarer Energien fossile Energieträger ersetzen kann. Ziel der weiteren Entwicklung des Modellierungsframeworks ist die Erweiterung mit zusätzlichen Komponenten und eine noch genauere Evaluierung anhand realer Betriebsdaten existierender Energiesysteme. Dadurch wird es in Zukunft möglich sein mit dem Modellierungstool abzuschätzen, welche Komponenten in Energiesysteme wirtschaftlich integriert werden können um den Anteil erneuerbarer Energien noch weiter zu steigern.

5. DANKSAGUNG

Das Projekt „Heat water storage pooling“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2018 durchgeführt.

LITERATUR

- Bynum M.L., Hackebeil G.A., Hart W.E., Laird C.D., Nicholson B., Sirola J.D., Watson J.-P., Woodruff D.L. (3. Ed.) (2021) Pyomo – Optimization Modeling in Python; USA: Springer International Publishing.
- EXAA (2021) Historische Marktdaten. Wien. [Online]. <https://www.exaa.at/marktdaten/historische-marktdaten/>. Zugegriffen am 15.06.2021.
- Kallrath J. (2. Ed.) (2013) Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Wiesbaden, Deutschland: Springer Spektrum.

Klima- und Energiefonds (2019), Heat water storage pooling. Wien. [Online]. URL: <https://energieforschung.at/projekt/heat-water-storage-pooling/>. Zugegriffen am 10.09.2021.

KONTAKTDATEN:

Lukas Gnam

Steinamangerstraße 21

7423 Pinkafeld

Email: lukas.gnam@fh-burgenland.at

Low-Cost-Technologien zur Einbindung kleiner el. Wärmespeicher in VKs

M. Rabensteiner

Award Energy Research GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: According to the current climate and energy strategy, the share of renewable energies in Austria will be increase further. The technically and economically possible potential to react to load changes is limited. As a result, the flexibility required to maintain the balance between production and consumption must be provided in other ways. This is particularly important for the federal state of Burgenland, where wind energy generation accounts for 96 % of energy production and the installed wind energy capacity is four times as high as the peak loads in the region.

In the course of the “Heat water storage pooling” research project, individual heat storage units of all sizes are to be connected to one another to form a storage pool using a virtual power plant. This storage pool is intended to increase the flexibility of the energy market. A suitable business model should enable economical operation for energy suppliers, network operators as well as owners of the storage system. The current free storage capacity of this storage pool is determined using stochastic methods, which in turn are based on individual measurements.

For business model development, it is very important to estimate the free storage capacity in this storage pool as precisely as possible. But particularly small electrical heat storage systems, which are often installed in single and multi-family apartments, are often only equipped with an inadequate measurement and control infrastructure. The determination of the free storage capacity as well as the control of this storage is therefore challenging. In the proposed work, cost-effective possible solutions are to be presented. This includes, among other things, how such storage units can be connected to the virtual power plant and how they can communicate with it and how they can be controlled by it, provided that the security of supply is guaranteed.

One of the approaches to a solution is to use a remote-controlled relay. By retrofitting a temperature (cold water temperature) and a current measurement, the actual electric hot water storage tank is not interfered with. Unlike other methods, this approach enables a wide variety of electric hot water storage tanks to be retrofitted with the least amount of work. The first simulation results already show that the estimation of the free storage capacity is sufficiently accurate. To use the system, it only needs to be calibrated a few days beforehand. With an approach of artificial intelligence, the estimation of the free storage capacity can be made more precise.

1. EINLEITUNG

Grundsätzlich werden im Forschungsprojekt “Heat water storage pooling” Wärmespeicher aller Größen und deren Einbindung in das Virtuelle Kraftwerk (VK) untersucht. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf kleine und mittlere Wärmespeicher, wie sie in Einfamilien- (EFH) und Mehrparteienhäusern (MPH) zum Einsatz kommen.

Im Forschungsprojekt wird der Ansatz verfolgt, dass investive Maßnahmen für die Einbindung von Speichern in das VK weitestgehend vermieden werden. Aber vor allem bei kleinen und mittelgroßen Speichern, ist aufgrund der nicht vorhandenen Schnittstellen, eine Messung der Rückkopplung unmöglich, so dass die Speicher „blind“ angesteuert werden müssen – mit erheblichen Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit. Deshalb forciert das Projekt eine minimale Nachrüstung von Messinfrastruktur. Diese Lösung bietet folgende Vorteile:

- Gewährleistung der Versorgungssicherheit (Raumwärme, Warmwasser)
- Einfachere Standardisierung für verschiedenste Speichersysteme
- Abgestimmte Messinfrastruktur mit passenden Schnittstellen zur Einbindung in das VK
- Geringe investive Maßnahmen

Grundsätzlich werden im Projekt zwei Systeme unterschieden. Das sind zum einen konventionelle Elektroboiler zur Brauchwarmwasserbereitung und -speicherung, welche häufig als Wandhängespeicher ausgeführt sind, zum anderen sind das verschiedenste Wärmepumpenanwendungen für die Bereitstellung von Raumwärme und/oder Brauchwarmwasser. In Tab. 1 sind für diese beiden Systeme wichtige Aspekte der Integration in den Speicherpool gegenübergestellt.

Tab. 1: Überblick über verschiedene Speichersysteme und deren Einbindung in das VK

System	Messung	Ansteuerung	Messung ↓ VK	VK ↓ Ansteuerung
Elektroboiler	Shelly 1PM	Shelly 1PM	Shelly 1PM ↓ MQTT-Broker ↓ VK	VK ↓ Shelly 1PM
Wärmepumpenanwendungen	MQTT-Sensoren	SG Ready-Schnittstelle oder individuelle Ansteuerungen	MQTT-Sensoren ↓ MQTT-Broker ↓ VK	VK ↓ SG Ready-Schnittstelle oder individuelle Ansteuerungen

Eine wichtige Größe für die Integrierung in den Wärmespeicherpool ist die individuelle freie Speicherkapazität. Das ist diejenige elektrische Arbeit, die dem System zum aktuellen Zeitpunkt bis zu einer, zu definierenden maximalen Ladung, zugeführt werden kann. Bei einem Elektroboiler zur Brauchwarmwasserbereitung ist die maximale Ladung zum Beispiel durch die zulässige Speichertemperatur vorgegeben. Bei einer Wärmepumpe, welche mit dem „Smart Grid Ready“-Label (SG Ready-Label) ausgestattet ist, ist die maximale Ladekapazität durch die eingestellten Parameter in den Betriebszuständen 3 (Niedrigpreismodus) und 4 (Überkapazitätsmodus) definiert (Bundesverband Wärmepumpe e.V. 2012).

2. EINBINDUNG KONVENTIONELLER ELEKTROBOILER

Bei dieser Art von Elektroboilern handelt es sich um konventionelle Aggregate zur Aufbereitung und Speicherung von Brauchwarmwasser in Einfamilienhaushalten. Gängige Brauchwarmwasserspeicher für Einfamilienhaushalte fassen zwischen 80 l und 300 Liter. Diese Speicher, welche normalerweise als Hängespeicher ausgeführt sind, besitzen eine stufenlose Temperaturregelung, die an der Vorderseite des Speichers mit einem Drehknopf eingestellt werden kann. In diesen Speichern befindet sich oberhalb des elektrischen Heizstabs die Temperaturmessung. Der Boiler arbeitet grundsätzlich mit einem 2-Punkt-Regler. Die Temperaturdifferenz, von maximaler Speichertemperatur, welche eingestellt wurde, und minimaler Temperatur, an der der Heizstab wieder den Heizvorgang startet, beträgt normalerweise nur wenige Kelvin (etwa 5 K).

Der Austausch des Messfühlers des 2-Punkt-Reglers mit einer parallelen Messung, um die aktuelle Speichertemperatur an das VK weiterleiten zu können, wurde zusammen mit dem Unternehmen CO-THERM S.A.S., welches solche Hybridlösungen in ihrem Portfolio hat, als zu komplex und zu schwer zum Standardisieren angesehen. Aus diesem Grund wurde ein Messprinzip entwickelt, welches sich ausschließlich Messstellen außerhalb des Speichersystems bedient.

Durch die Messung der Frischwasser- oder Warmwassertemperatur und deren zeitlicher Verlauf kann man auf die entnommene Warmwassermenge schließen. Die Messung der Warmwassertemperatur bietet sich nur an, wenn keine Zirkulationsleitung in Betrieb ist. Die Temperaturänderung hat aber nur bedingt Aussagekraft über den Volumenstrom der Warmwasserentnahme. Ob aktuell zum Beispiel 100 l/h oder 1.000 l/h pro Stunde Warmwasser entnommen wird, ist aus diesem Temperaturverlauf nur bedingt herauszulesen. Es ist aber Ziel des Projektes, ob nicht die Volumenströme der Warmwasserentnahme sich über längere Zeiten ähneln und dadurch der Fehler vernachlässigt werden kann. Auch die Länge der Zuleitung hat einen Einfluss.

Im Falle einer Brauchwarmwasserabnahme kommt es zu einer schlagartigen Temperaturänderung an den Messstellen. Nach Beendigung der Warmwasserentnahme im Haushalt, kommt es wieder zum Stillstand der Wassersäule, und somit mit einer gewissen Verzögerung aufgrund der Trägheit des Systems zu einer Annäherung der gemessenen Temperatur an der Messstelle an die Umgebungstemperatur.

Die Fläche die sich ab dem Zeitpunkt, an dem die Warmwasserentnahme detektiert wird, durch die Integration der Temperaturdifferenz von Ausgangstemperatur zum Zeitpunkt der Detektion (was bei längerer Nichtentnahme von Warmwasser im Wesentlichen der Umgebungstemperatur entspricht) und aktueller Temperatur bis hin zum Wiedererreichen der ursprünglichen Ausgangstemperatur ergibt, ist zumindest theoretisch ein Maß der entnommenen Warmwassermenge aus dem System, sofern von einem konstanten Warmwasservolumenstrom ausgegangen wird.

3. EINBINDUNG VON WÄRMEPUMPENANWENDUNGEN

Bei Wärmepumpen ist eine standardisierte Einbindung in das VK aufgrund der vielen Hersteller und Bauarten sowie Systemkonfigurationen schwer. Der Projektansatz verfolgt grundsätzlich eine Einbindung von Speichern in das VK ohne nennenswerte Investitionen. Weiters soll die definierte Schnittstelle zwischen Speichern und VK standardisiert werden können. Das sind zwei grundlegende Punkte, welche insbesondere bei Wärmepumpenanwendungen im Einfamilienhausbereich schwer zu erreichen sind. Für eine Abstimmung der Systeme wurde mit Wärmepumpenherstellern gesprochen, mit der Erkenntnis, dass eine standardisierte Einbindung nur mit der bereits standardisierten SG Ready-Schnittstelle möglich ist. Ältere aber auch vor allem kleinere Wärmepumpen, besitzen aber nur selten dieses SG-Ready Label. Für Testuser im Projekt mit solchen Systemen werden im Projekt daher individuelle Lösungen überlegt.

In Kapitel 2 wurde bereits detailliert erklärt, wie die freie Speicherkapazität von konventionellen Elektroboilern durchgeführt werden kann. Die Berechnung der freien Speicherkapazität für Wärmepumpenanwendungen mit einer SG Ready-Schnittstelle gestaltet sich etwas anders, da man von 4 verschiedenen Betriebszuständen ausgeht. Im Normalfall wird Betriebszustand 2 vorliegen. Ziel ist es nun den Unterschied zwischen der Speicherladung im aktuellen Zustand (zum aktuellen Zeitpunkt) und der Speicherladung im Betriebszustand 3 oder 4 zu berechnen. Dabei müssen die Einstellungen der einzelnen Betriebszustände, welche in der Bedienoberfläche der Wärmepumpe eingegeben werden, bekannt sein. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass es sowohl für die Bereitstellung von Raumwärme ($Q_{HZ_{2 \rightarrow 3}}$) als auch für die Brauchwarmwasserbereitung eine freie Speicherkapazität ($Q_{WW_{2 \rightarrow 3}}$) geben wird, und sich die gesamte freie Speicherkapazität aus diesen beiden Themen zusammensetzt (2).

$$Q_{2 \rightarrow 3} = Q_{HZ_{2 \rightarrow 3}} + Q_{WW_{2 \rightarrow 3}} \quad (1)$$

Die Gleichung kann analog für die Aktivierung von Betriebszustand 4 verwendet werden ($Q_{2 \rightarrow 4}$). Die aktuelle Speicherladung kann aus den Echtzeitdaten der nachgerüsteten Messinfrastruktur ermittelt werden. Die Speicherladung im Betriebszustand 3 oder 4 kann durch die hinterlegten Parameter bei der Definition der einzelnen Betriebszustände berechnet werden.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit werden sowohl für Elektroboiler zur Brauchwarmwasserbereitung und -speicherung als auch für verschiedenste Wärmepumpenanwendungen Technologien vorgestellt, die eine kostengünstige Einbindung in ein Virtuelles Kraftwerk ermöglichen. Da eine „blinde“ Ansteuerung, basierend rein auf Lastgängen aus versorgungssicherheitstechnischen Gründen nicht möglich ist, und ein Eingriff in bestehende Regelsysteme weitestgehend vermieden werden soll, um standardisierte Schnittstellen schaffen zu können – was wiederum ein Upscaling des Systems erleichtert – muss eine Messinfrastruktur nachgerüstet werden, sofern dies (was bei Mehrparteienhäusern, aus Wartungs- und Instandhaltungsgründen bereits oft ausgeführt wurde) noch nicht durchgeführt wurde.

Bei konventionellen Elektroboiler für Einfamilienhaushalte stellt sich das Nachrüsten der Messinfrastruktur als herausfordernd dar, da Sensoren im Speicher direkt nicht angebracht werden können und somit die Speicherladung nicht direkt gemessen werden kann. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein Messprinzip vorgestellt, das ausschließlich Messergebnisse außerhalb des Speichers zur Berechnung heranzieht. In der Praxis konnte dieses Messprinzip bereits erfolgreich getestet werden. Für einen Großeinsatz muss der Berechnungsfehler dieses Messprinzips aber noch minimiert werden. Aus diesem Grund wurde daher eigens dafür ein Speicherprüfstand aufgebaut, an dem dieses Messprinzip weiter optimiert werden kann.

Bei der Speichersystemen mit integrierten Wärmepumpen wird die Einbindung in das VK bevorzugt über die standardisierte SG Ready-Schnittstelle erfolgen.

LITERATUR

Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2012) Regularium für das Label „SG Ready“ für elektrische Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen, Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP), Berlin

KONTAKTDATEN:

Dr. techn. DI Markus Rabensteiner
Reininghausstraße 13A
8020 Graz
Email: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

Erneuerbar Heizen und Kühlen mit „Energie aus Abwasser“ am Beispiel Zentrale Wien Kanal

R. Wiedemann

Rabmer GreenTech GmbH, Altenberg, Österreich

A. Gennari

Fachhochschule Oberösterreich Wels, Österreich

J. Koller

Rabmer Bau & Umwelttechnik GmbH, Altenberg, Österreich

ABSTRACT: 70-75 % of the energy consumption in the building sector is used for heating, cooling and warm water treatment. To date, almost exclusively CO₂-critical energy sources have been used for this purpose. Accordingly, it is important to rely on renewable energy sources in this area – the waste water energy flowing in the sewer system can make a significant contribution to this. The energy from municipal and commercial wastewater in Austria currently passes largely unused into the sewer networks and wastewater treatment plants, and subsequently into the receiving waters and rivers. Wastewater is a year-round, 365-day heat source and can be used with modern heat exchangers and heat pumps. The use of energy from wastewater for heating and cooling contributes to the achievement of climate protection goals and makes economic sense. The energetic use of waste water for the production of heat is classified as ‘renewable energy’ across the EU. Energy from wastewater is ecological and CO₂-neutral, can make a valuable contribution to the energy transition as well as to the decarbonisation of the original areas and thus to the achievement of climate and energy targets. In Vienna, the new corporate headquarters of ‘Wien Kanal’ in Vienna-Blumenthal is currently being built. The sustainable energy supply of this new corporate headquarters is ensured by the innovative use of wastewater for heating and cooling, combined with a new, innovative monitoring system. The company headquarters is under construction, the commissioning of the heat exchangers and monitoring took place in summer 2021, the trial operation of the entire heating and cooling will run until 09-10 2021. The article presents the framework conditions and contents of the project and a resulting multiplication potential. Furthermore, best practice examples for innovative energetic use of wastewater in the sewer as well as bypass solutions will be presented.

1. EINLEITUNG

70-75 % des Energieverbrauches im Gebäudesektor werden für die Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung verwendet. Bis dato werden dafür fast ausschließlich CO₂-kritische Energiequellen verwendet (REN21 2020). Entsprechend wichtig ist es daher in diesem Bereich auf erneuerbare Energieträger zu setzen – die in der Kanalisation fließende Abwasserenergie kann dabei einen wesentlichen Beitrag leisten.

Die Energie aus den kommunalen und gewerblichen Abwässern in Österreich geht derzeit weitestgehend ungenutzt in die Kanalnetze und Kläranlagen beziehungsweise danach in die Vorfluter und Flüsse. Abwasser ist eine ganzjährig, 365-Tage verfügbare Wärmequelle und kann über moderne Wärmetauscher und Wärmepumpen genutzt werden. Die Tagesverläufe mit der Morgen- und Abendspitze entsprechen dem Wärmeverbrauch. Der Einsatz von „Energie aus Abwasser“ für Heizung und Kühlung trägt zur Erreichung der Klimaschutzziele bei und ist volkswirtschaftlich sinnvoll. Die energetische Nutzung von Abwasser für die Erzeugung von Wärme ist EU-weit als „erneuerbare Energie“ eingestuft. „Energie aus Abwasser“ ist ökologisch sowie CO₂-neutral, kann einen wertvollen Beitrag zur Ener-

gievende sowie zur Dekarbonisierung der urbanen Gebiete und damit zur Erreichung der Klima- und Energieziele leisten.

Das für Heizung und Kühlung nutzbare Energiepotenzial in den kommunalen Abwasserkanälen wird mit circa 14 % des derzeitigen Wärmebedarfs von Gebäuden beziffert (Ecke & Göke 2017). Auf Grund des Klimawandels ist in Zukunft mit einer noch stärkeren Änderung der Rahmenbedingungen wie Aufheizung des urbanen Raumes zu rechnen – dadurch wird Kühlung immer wichtiger. Zusätzlich könnte man, unter Einsatz monovalenter Wärmepumpen, aus dem Kläranlagenablauf von geeigneten Kläranlagen in Österreich jährlich 3144 GWh/a thermische Energie gewinnen (Neugebauer et al. 2015), diese könnte man aber auch zur energetischen Optimierung von Kläranlagen, unter anderem für die Klärschlamm-Trocknung einsetzen. In Wien wird derzeit die neue Unternehmenszentrale der Wien Kanal in Wien-Blumenthal errichtet. Die nachhaltige Energieversorgung dieser neuen Unternehmenszentrale wird durch die innovative Nutzung von Abwasser für die Heizung und Kühlung, kombiniert mit einem neuartigen Monitoringsystem, sichergestellt. Die Unternehmenszentrale ist im Bau, die Inbetriebnahme der Wärmetauscher und des Monitorings erfolgte im Sommer 2021, der Probebetrieb der gesamten Heizung und Kühlung läuft noch bis voraussichtlich 09-10 2021.(Wiedemann et al. 2021)

Der Beitrag stellt die Rahmenbedingungen und Inhalte des Projektes und sich daraus ergebende Multiplikationspotenzial vor. Des Weiteren werden Best Practice-Beispiele für die innovative energetische Nutzung von Abwasser im Kanal sowie über Bypass-Lösungen vorgestellt.

2. VORSTELLUNG DER TECHNOLOGIEN „ENERGIE AUS ABWASSER“

Für die Anwendung „Energie aus Abwasser“ steht ein breites Anwendungsspektrum mit unterschiedlichsten Technologien zur Verfügung.

Warmes Abwasser innerhalb von Objekten sowie außerhalb im umliegenden öffentlichen Kanalnetz kann unter entsprechenden Rahmenbedingungen für die Heizung und Kühlung der Gebäude, Warmwasseraufbereitung, sowie damit zur Vermeidung fossiler Brennstoffe, höchst effizient eingesetzt werden.

Die Anwendungen beginnen beim Einsatz von Wärmetauschern im Gebäude, bevor das Abwasser in den Kanal eingeleitet wird, bei der Nutzung von Kanal-Abwasserwärme für die komplette Heizung und Kühlung von Gebäuden oder zur Einspeisung von Wärme und Kälte in Fern- und Nahwärme- bis hin zu Kältenetzwerken.

Die grundsätzliche Technologie besteht aus einer Kombination von entsprechend konzipierten Wärmetauschern, Wärmepumpen und einem innovativen Monitoring. Die Energie wird mittels Wärmetauscher dem Abwasser entzogen und mit speziellen Abwasser-Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau gebracht und so die Energie für die Beheizung und Kühlung von größeren Gebäuden nutzbar gemacht. Im Sommer können Abwasserenergieanlagen auch zur Raumkühlung eingesetzt werden. Die Wärmepumpe wirkt dabei in „umgekehrter“ Weise als Kältemaschine. Diese einzigartige Kombination von Heizung und Kühlung vermeidet auch Rückkühler, zum Beispiel, auf Dächern – diese können sinnvoller für PV-Anlagen genutzt werden. Auch eine direkte Nutzung der Abwasserkälte mittels Bauteilkühlung ist möglich.

Vorab notwendig ist eine Prüfung der konkreten Eignung der jeweiligen Kanalabschnitte hinsichtlich Trockenwetterabfluss, Temperatur, Füllstand des Abwassers, Entfernung der Abnehmer, Geometrie Kanäle und Schächte. Zur Sicherstellung eines ungestörten Kanalbetriebs sind entsprechende Vorgaben, wie etwa zur Temperatur des Abwassers, einzuhalten. (ÖWAV 2021).

Bei Anlagen mit einer Leistung von 50 kW bis ca. 1 MW werden spezielle Wärmetauscher direkt im Kanalrohr verlegt (siehe Abb. 1). Die Leitungen führen zum Technikraum des Gebäudes, wo sich die Wärmepumpe befindet, welche an die Heiz- und Kühlsysteme im Gebäude angeschlossen ist. Moderne, innovative Monitoring-Einrichtungen überwachen das Gesamtsystem.

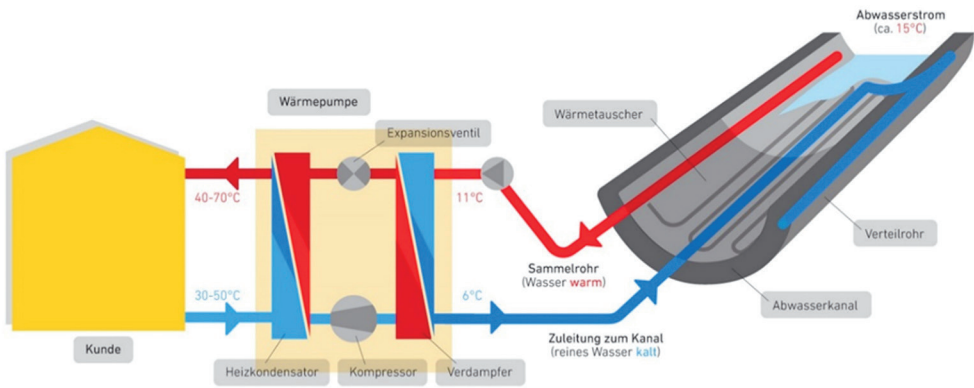


Abb. 1: Energetische Nutzung Kanalabwasser mit im Kanal eingebauten Wärmetauscher – Systemen, Zu- und Rückleitung zu Wärmepumpe (Pichler, 2021)

Bei Großanlagen der energetischen Nutzung von Abwasser mit einer Leistung von mindestens 1 MW bis zu 10 MW wird das Kanalabwasser über einen Schacht entnommen, grob gereinigt und mit Pumpen in einen Technikraum geleitet, wo innovative Wärmetauscherbündel in Kombination mit Wärmepumpen die Abwärme wiederum für die Gebäudeheizung im Winter bzw. Kühlung im Sommer nutzbar machen (siehe Abb. 2).

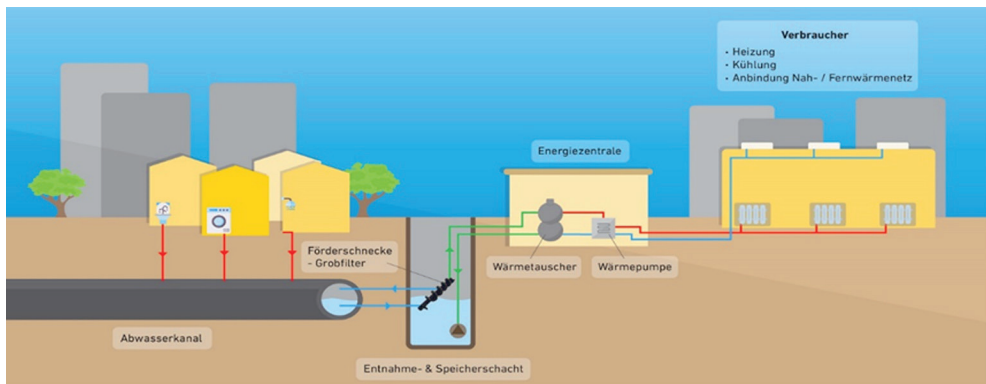


Abb. 2: Energetische Nutzung von Abwasser über Bypass-Anlagen mit extern positionierten Wärmetauschern und Wärmepumpen (Wiedemann et al., 2021))

Die Erhebung und Digitalisierung von Daten sind auch im Bereich der Abwassersammlung bzw. Reinigung auf dem Vormarsch. Diese liefern nicht nur wichtige Informationen über das Abwasser-Monitoring von RNA-Erbinformationen (Covid-19), sondern auch über relevante Parameter zur Nutzung der thermischen Energie durch die Entwicklung kontinuierlicher Monitoringsysteme. Die kontinuierliche Überwachung der Prozesse zwischen Wärmetauscher und Wärmepumpen sowie deren Einflüsse auf Heiz- und Kühlsystem und den Kanalbetrieb sind Inhalte moderner Monitoringsysteme.

3. INHALT DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Das in Realisierung befindliche Projekt hat sowohl Heizung als auch Kühlung des modernen Firmensitzes in Wien zu gewährleisten.

Die zu erfüllenden Anforderungen für die Heizung und Kühlung der Unternehmenszentrale liegen bei

- Heizung 215 kW (max. 450 kW) an Wärmepumpe
- Kühlung 400 kW (max. 500 kW) an Wärmepumpe

Die wissenschaftliche Fragestellung im gegenständlichen Projekt betrifft die Analyse der Rahmenbedingungen, Potenzial- und Bedarfserhebung, der Kanalkonfiguration, die darauffolgende optimale Auswahl von innovativen Wärmetauschern, kombiniert mit Installation eines innovativen Monitoring-Systems für Wärmetauscher- und Kanalbetrieb. Auf Grund der sich ändernden Bedingungen sowohl im Abwasserkanal, hinsichtlich Temperatur und Durchfluss, als auch bedarfsseitig Heiz- bzw. Kühlleistung war es notwendig, über ein innovatives Monitoringkonzept eine hohe Flexibilität zu gewährleisten.

Folgende Forschungsgegenstände werden in dem Forschungsprojekt, betreffend dem Konzept für smarte Nutzung von erneuerbarer Energie aus kommunalem Abwasser, behandelt:

- Konstruktion und Installation spezifischer Wärmetauscher (siehe Abb. 3)
- Entwicklung, Installation und Betrieb eines innovativen Monitorings für Unterstützung Betrieb Heiz-/Kühlzentralen, Monitoring Einfluss auf Kanalbetrieb (Temperaturen, Füllstand etc.; siehe Abb. 4)



Abb. 3: Fertig-montierte, genau an die Konfiguration des bestehenden Kanals angepasste, Wärmetauscher (Rabmer-Uhrig /Therm-Liner, Foto: Wiedemann)



Abb. 4: Montage der Zu- und Rückleitungen sowie des Monitoringsystems im Kanal, Blick auf mittig angebrachten Füllstandssensor (Foto: Wiedemann)

Es wurden sowohl im Kanal als auch im Monitoring-Schacht Sensorik und Messtechnik installiert – für die kontinuierliche Messung von

- Temperatur vor und nach dem Wärmetauscher im Kanal
- Temperaturen im Primärkreislauf bei Vor- und Rücklauf
- Füllstand im Kanal
- Durchfluss der Zu- und Rückleitung, Strömungsgeschwindigkeit
- Druckmessung der Zu- und Rückleitung,
- Aus Messwerten abgeleitete Werte: Durchfluss Kanal, Temperaturdifferenzen, Druckverlust, Entzugsleistung/Energiemenge.

Über das innovative Monitoringsystem, welches in dieser Form erstmalig in Österreich zum Einsatz kommt, kann die Kontrolle des laufenden Betriebes zur Absicherung der Heiz- und Kühlleistung, die erforderliche Spreizung für die Wärmepumpe sowie notwendiger Durchflussmengen erfolgen. Darüber hinaus kann der Einfluss auf den Kanalbetrieb (Füllstände, Einflüsse auf Temperaturen durch energetische Nutzung, Hydraulik) kontinuierlich kontrolliert werden. Die Übertragung erfolgt Web-basiert.

Die Verlegung der Wärmetauscher (Therm-Liner/Rabmer-Uhrig) mit einer Länge von etwa 80 Metern wurde Ende 2020 und der Ausbau des Monitoringsystems (siehe Abb. 5) mit Juli 2021 abgeschlossen. Der Probebetrieb wird voraussichtlich im Oktober 2021 abgeschlossen sein. Das Forschungsprojekt ist auch ein Teil der Forschungsinitiative ‚ThermaFLEX‘ (2021).

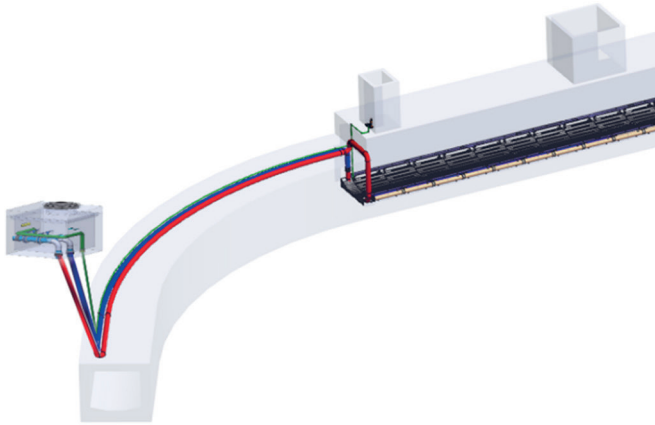


Abb. 5: Schema Leitungsführung Kanal-Monitoring-Schacht (Rabmer-Uhrig, 2021)

Seit August 2021 funktioniert das Monitoringsystem kontinuierlich. Über eine entsprechende Fernüberwachung werden die einzelnen Messdaten erhoben und die jeweiligen, sich ständig ändernden Betriebszustände analysiert. Beispiel Darstellung Änderung Abwassertemperatur durch energetische Nutzung: Die Temperaturdifferenz des Abwassers vor und nach dem Wärmeübertrager beläuft sich in dem betrachteten Zeitraum auf durchschnittlich gerundet nur $0,1\text{ °C}$ und maximal $0,3\text{ °C}$. (siehe Abb. 6). Detaillierte Informationen werden nach Ende des Probebetriebes und Aufnahme des Dauerbetriebes vorliegen.

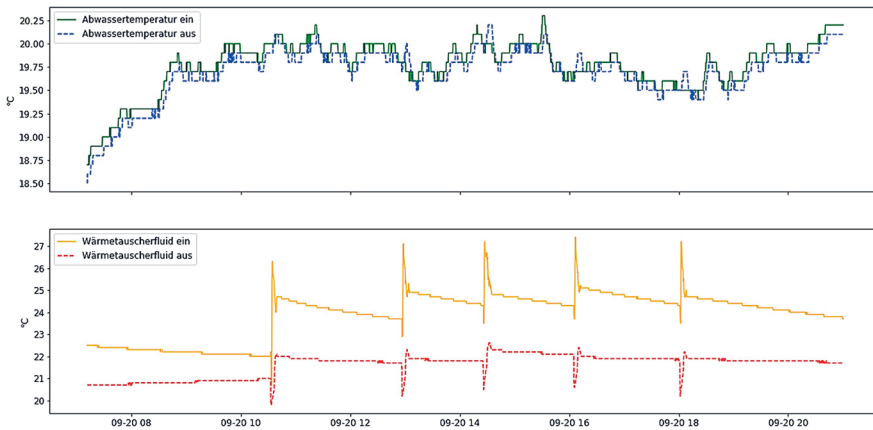


Abb. 6: Temperaturen vor und nach Abwasserwärmeträger am 20.09.21 (Rabmer-Uhrig 2021)

Obwohl der endgültige Probebetrieb der Gesamtanlage zum aktuellen Zeitpunkt (Stand 20.09.2021) noch ausständig ist, kann auf Grund der bereits vorliegenden Daten festgestellt werden, dass das Monitoringsystem auch unter stark wechselnden Rahmenbedingungen gut funktioniert. Bisher werden die vorab ausgelegten Werte wie Durchflussmengen, Druck etc. erreicht. Kritische Werte, wie maximaler Druckabfall und Temperaturabsenkung des Abwassers nach Nutzung werden unterschritten. Die Soll/Ist-Performance wird kontinuierlich abgebildet und der Anlagenzustand über das Monitoring bewertet. An die Übergabe nach dem Probebetrieb folgt ein etwa einjähriges Monitoring.

4. BEST PRACTICE BEISPIELE FÜR „ENERGIE AUS ABWASSER“

Als weitere Best Practice-Beispiele für die energetische Nutzung von Abwasser für Heizung und Kühlung sind hervorzuheben:

Wärmetauscher im Kanal:

- Stuttgart/DE 2019: 300 kW Heizung/484 kW Kühlung ab Wärmetauscher
- Innsbruck/AT 2019: 150 kW Heizung ab Wärmetauscher
- Wangen/DE 2019: 400 kW Nahwärme

Bypass-Anlagen mit externen Wärmetauschern:

- Straubing/DE 2010: 210 kW Heizung
- Budapest/HU 2014: 3,9 MW Heizung/ 3,3 MW Kühlung
- Uni Szeged/HU 2017: 1,6 MW Heizung/1,5 MW Kühlung

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die effiziente, energetische Nutzung von kommunalem und gewerblichen Abwasser kann einen wertvollen Beitrag zur Dekarbonisierung des Wärme- und Kältesektors und somit zu Klimaschutz sowie Energiewende leisten. Die bisherigen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt zeigen klar, dass mit dieser erneuerbaren Energieform sowie dem ausgeführten innovativen Monitoringsystem nachhaltig sowohl Wärme als auch Kälte bereitgestellt werden können.

Aus dem realisierten Abwasser-Energie Projekt kann man bereits jetzt ein sehr hohes Multiplikationspotenzial in österreichischen und europäischen Städten, Gemeinden und Verbänden ableiten. Die Erkenntnisse aus dem Monitoring werden ständig analysiert und so das Sensoring- und Steuerungssystem dementsprechend kontinuierlich angepasst. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft größere Anlagen zur energetischen Nutzung von Abwasser nur noch gemeinsam, mit einem entsprechenden Monitoringssystem realisiert werden.

LITERATUR

- Ecke J. & Göke L. (2017) Energie aus Abwasser: Das bislang unentdeckte Potential für die Wärmewende. enervis energy advisors GmbH. Verfügbar online unter <https://www.uhrig-bau.eu/wp-content/uploads/2020/11/enervis-studie-energie-aus-abwasser.pdf>
- Neugebauer G., Kretschmer F., Kollmann R., Narodoslowsky M., Ertl, T. & Stoeglehner G. (2015) Mapping Thermal Energy Resource Potentials from Wastewater Treatment Plants. Sustainability 7 (10), pp. 12988–13010.
- ÖWAV (2021) Arbeitsbehelf 65 Energetische Nutzung des thermischen Potenzials von Abwasser. Wien, Austria: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.
- REN21. (2020) Renewables 2020 Global Status Report. Paris, France: REN21 Secretariat.
- ThermaFLEX (2021) Energiequelle Abwasser als Thema in der Zeitschrift nachhaltige technologien, AEE-Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, <https://thermafex.greenenergylab.at/energiequelle-abwasser-als-thema-in-der-zeitschrift-nachhaltige-technologien/>
- Wiedemann R., Rusbeh R., Leusbrock I. & Kelz J. (2021) Innovative Abwärmenutzung aus dem Kanal für die netzgebundene Wärmeversorgung. In: Nachhaltige Technologien, 3/2021. Gleisdorf, Austria: AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, pp. 9-11.
- Pichler, K (2021):Energie aus Abwasser im Aufwind, Vortrag auf „Internationaler Großwärmepumpenkongress“, Linz.

Rabmer-Uhrig (2021) Unveröffentlichte Projektdaten, Rabmer Greentech GmbH, Altenberg, Österreich.

KONTAKTDATEN:

Dr. Rainer Wiedemann

Bruckbachweg 23, 4203 Altenberg

E-Mail: rainer.wiedemann@rabmer.at

Innovatives Modernisierungskonzept zur Effizienzsteigerung im Biomasse-Heizwerk Saalfelden

J. Bärnthaler, M. Theissing

FH-Joanneum, Inst. für Energie-, Verkehrs- und Umweltmanagement, Kapfenberg, Austria

T. Herbst, G. Seifert

Salzburg AG, Salzburg, Austria

J. Kelz

AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: The integration of a heat pump into the biomass district heating plant Saalfelden pursues the following objectives:

- Provision of additional power capacity for further grid expansion in the range of 1.5 - 2 MW
- Increasing the overall efficiency of the heating plant through flue gas condensation and thus recovering heat from the flue gas
- Reduction of fossil energy use for peak load coverage

In addition to a further increase in performance and efficiency, the integration of the heat pump also leads to the optimisation of heat recovery from the flue gas. The flue gas condensation serves as the heat source. By further cooling the return flow of the flue gas condensation from currently approx. 52 °C to approx. 35 °C through the heat pump, a considerable increase in efficiency of the flue gas condensation is achieved. The district heating return serves as the heat sink. The energy is thus used in the boiler circuit to preheat the boiler water.

The heat source used for the heat pump is generally given for any type of CHP plant (regardless of the primary energy: waste, gas, biomass, etc.) with appropriate flue gas cleaning. There is a high multiplication potential for the modernisation concepts in many Austrian and European heating systems.

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Die Erreichung mittel- und langfristiger Klimaziele ist eine große Herausforderung, bei der flexible und nachhaltige netzgekoppelte Wärmesysteme ein zentrales Element darstellen werden. Unsere aktuelle Wärmeversorgung sowie die Versorgungsqualität und Robustheit wird noch großteils durch die Vielseitigkeit und einfache Nutzung fossiler Brennstoffe gewährleistet. In zukünftigen, nachhaltigen und dekarbonisierten Wärme- und Energiesystemen steigt einerseits die Systemflexibilität (z.B. durch Erhöhung des Anteils erneuerbare Energien, der Volatilität dieser, der zentralen/dezentralen Speicherung, Sektorkopplung, etc.), andererseits muss der aktuelle Versorgungsstandard bzw. die Versorgungssicherheit bei stabilen Energiekosten für Endkund*Innen gewährleistet bzw. weiter gesteigert werden. Um den Anteil der erneuerbaren Energieerzeugung zu erhöhen und die Effizienz bestehender Systeme zu steigern, müssen somit alternative Wärmequellen integriert und neue technische Konzepte zur Modernisierung und Effizienzsteigerung entwickelt und zur Marktreife gebracht werden. Für eine nachhaltige und effiziente Dekarbonisierung ist die Nutzung der regionalen (erneuerbaren) Energiequellen essentiell. Dabei könnten in Zukunft auch innovative Modernisierungs-Konzepte zur Effizienz-Steigerung gekoppelt mit einer nachhaltigen Abwärmenutzung aus Niedertemperaturquellen für Heiz- und Kühlzwecke wie z.B. die Nutzung der im Rauchgas enthaltenen Wärmeenergie gekoppelt mit dem Einsatz einer Wärmepumpe eine wichtige Rolle spielen.

2. METHODIK

Zur umfassenden Demonstration und Bewertung eines Modernisierungskonzeptes kombiniert mit der Integration einer Wärmepumpe wurde im Wärmenetz Saalfelden (Errichtung 1997, Netzlänge: 5,3 km, rund 50 Abnehmer, Wärmeaufbringung 2017: 13 GWh) ein 2-stufiger Modernisierungsprozess gestartet. Im Zuge der ersten Stufe (im Herbst 2020 abgeschlossen) wurde das bestehende Wärmenetz einer umfassenden Modernisierung unterzogen. Dabei wurden vielschichtige Maßnahmen bei der bestehenden Heizzentrale (Adaptierungen an der bestehenden Biomassefeuerung inkl. Leistungssteigerung der Rauchgaskondensation und verbesserter Abgasreinigung, Implementierung/Erneuerung der Leittechnik, Implementierung von Pufferspeicher und Puffermanagement, Implementierung eines Rauchgasreinigungssystems in Kombination mit der Rauchgaskondensation, etc.) sowie im Wärmenetz (gezielter Netzausbau, Optimierung der Netztemperaturen, Erneuerung der Thermohydraulik etc.) durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen von Stufe 1 werden aktuell technische Konzepte zur Integration einer Wärmepumpe zur weiteren Effizienzsteigerung und zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energie im Energiemix in Stufe 2 entwickelt und sollen nachfolgend realisiert werden (Ende 2021).

3. INTEGRATION DER WÄRMEPUMPE

Mit der Integration der Wärmepumpe in das Heizwerk Saalfelden werden folgende Ziele verfolgt:

- Bereitstellung einer zusätzlichen Leistungskapazität für einen weiteren Netzausbau im Bereich 1,5 – 2 MW
- Steigerung der Gesamteffizienz des Heizwerkes durch Rauchgaskondensation und somit Rückgewinnung von Wärme aus dem Rauchgas
- Reduktion des fossilen Energieeinsatzes für die Spitzenlastabdeckung

3.1 HYDRAULISCHE EINBINDUNG DER WÄRMEPUMPE

Neben der Dimensionierung der Wärmepumpe spielt auch die hydraulische Einbindung eine wesentliche Rolle in der Gesamteffizienz. Für die Festlegung des hydraulischen Konzeptes wurden unterschiedliche Varianten untersucht.

Das Heizwerk besteht aus einem Biomassekessel mit 2,5 MW Leistung und einer nachgeschalteten Rauchgaskondensation der Fa. Heger. Diese besteht aus je einem Wärmetauscher für die Economiser- und die Kondensationsstufe. Weiters ist ein Lastausgleichsspeicher zur Entkopplung der Wärmeerzeugung und des Wärmenetzes installiert. Für die Spitzenlastabdeckung ist ein Gaskessel installiert.

Die Netz-Rücklauftemperatur aus dem Fernwärmenetz beträgt rund 52 °C, damit wird zwar der Taupunkt unterschritten, allerdings ist die Wärmemenge aus der Wärmerückgewinnung und damit die Effizienzsteigerung gering.

Für die hydraulische Einbindung der Wärmepumpe wurden unterschiedliche Varianten diskutiert und analysiert. Der Kondensator aus der Rauchgaskondensation wird dabei immer als Wärmequelle verwendet. Über die elektrische Energiezufuhr für den Kompressor wird die Wärme auf ein höheres Temperaturniveau angehoben. Festzulegen war der Ort der Wärmeeinspeisung, dazu wurden zwei Varianten betrachtet:

- Integration in den Wärmespeicher: dazu müsste die Temperatur auf ein Niveau von 85 – 95 °C angehoben werden. Ein Vorteil dabei wäre, dass im Sommerbetrieb mit einem zusätzlichen Luftwärmetauscher am Dach des Heizhauses als Wärmequelle auch ein Sommerbetrieb denkbar wäre, und der Biomassekessel abgeschaltet werden könnte. Ein wesentlicher Nachteil wäre aber der verminderte COP/JAZ der Wärmepumpe durch den großen Temperaturhub, und dadurch ein hoher Stromaufwand. Für die Variante mit dem Sommerbetrieb würden zusätzliche Investitionskosten

für den Luftwärmetauscher einschließlich Schallschutzmaßnahmen erforderlich. Daher wird diese Variante verworfen. Durch den zusätzlichen Netzausbau kommt der Biomassekessel in einen Betriebsbereich, in dem er auch im Sommer auf niedriger Last betrieben werden kann.

- Integration in den Rücklauf des Biomassekessels: Dadurch wird der Temperaturhub für die Wärmepumpe signifikant niedriger, wodurch sich die Effizienz bzw. der COP/JAZ der Wärmepumpe deutlich verbessert. Die Kesselrücklauftemperatur wird dadurch erhöht, die Leistungen der beiden Wärmeerzeuger werden addiert. Bei höherem Leistungsbedarf steigt der Brennstoffeinsatz im Biomassekessel, und damit auch das Wärmeangebot in der Rauchgaskondensation. Dadurch korreliert auch die Leistung der Wärmepumpe mit dem Biomassekessel, das wirkt sich auf die gesamte Betriebsweise positiv aus. Durch die Kondensation des Rauchgases in den Bereich von ca. 35 °C ergibt sich eine hohe Energieausbeute und auch die Gesamteffizienz der Wärmeerzeugung. Daher wird diese Variante bevorzugt und zur Umsetzung empfohlen.

3.2 DIMENSIONIERUNG DER WÄRMEPUMPE

Für die Auslegung und Dimensionierung der Wärmepumpe wurde von FHJ eine Variationsrechnung durchgeführt, mit der das Verhalten sowohl der Rauchgaskondensationsanlage, als auch der damit verbundenen Wärmepumpe berechnet werden konnte.

Abb. 1 zeigt die Rauchgaslinie für ein Betriebsregime mit Kondensation für den Auslegungspunkt (Brennstoffwärmeleistung: 3.870 kW, Luftüberschuss: 1,63).

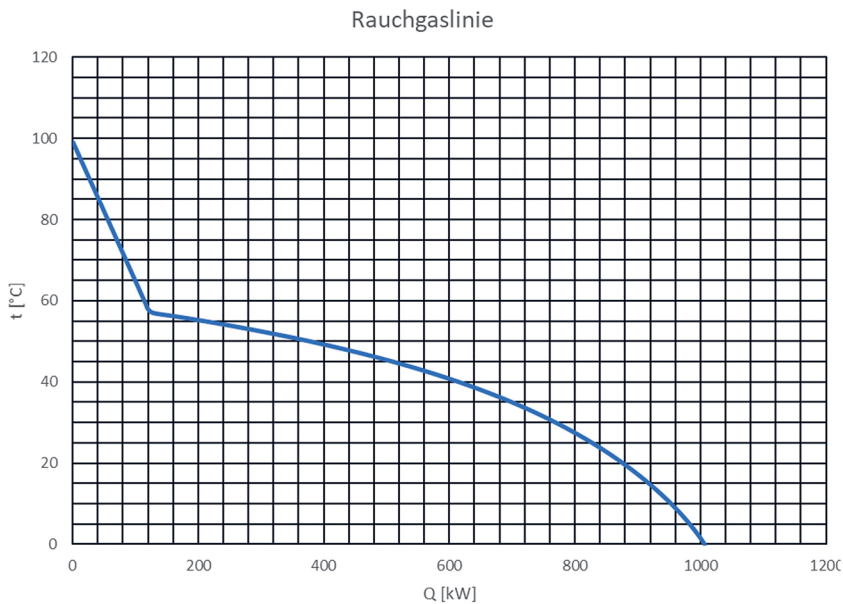


Abb. 1: Rauchgaslinie mit Kondensation für den Kesselbetrieb mit einer Brennstoffwärmeleistung 3.870 kW und einer Luftüberschusszahl von 1,63. Der Taupunkt liegt bei 57 °C.

Auf Grundlage dieser Rauchgaslinie wurde eine Variationsrechnung für verschiedene Temperaturniveaus und Aufwärmspannen des (kalten) Wärmepumpenkreises durchgeführt, wobei die technische Charakteristik des Wärmetauschers Berücksichtigung fand. In Abb. 2 ist das Ergebnis dieser Variationsrechnung dargestellt.

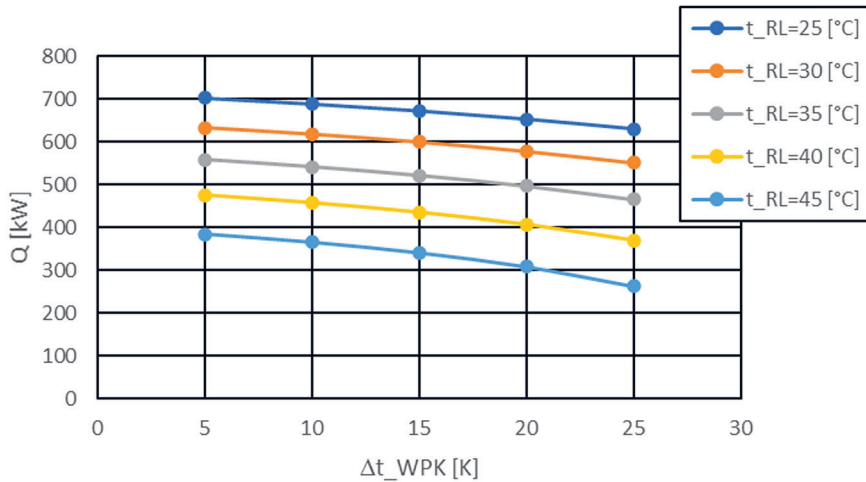


Abb. 2: In der Rauchgaskondensationseinrichtung gewinnbare Wärme in Abhängigkeit von Temperaturniveau (t_{RL}) und Aufwärmspanne (Δt_{WPK}) des kalten Wärmepumpenkreises.

Die Basisbestimmung der Wärmepumpeneigenschaften (COP) erfolgt näherungsweise über einen idealen Rechtecksprozess (Carnot) mit Ergänzung eines exergetischen Wirkungsgrades.

$$COP_{real} = \zeta \cdot \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}}$$

COP_{real} Leistungszahl

T_{ab} mittlere Temperatur der abgegebenen Wärme K

T_{zu} mittlere Temperatur der zugeführten Wärme K: $T_{zu} = t_{RL} + \frac{\Delta t_{WPK}}{2}$

ζ exergetischer Wirkungsgrad - (typische Werte: 0,45 bis 0,5)

4. ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Nach Abschluss von Stufe 1 (vor der Integration der Wärmepumpe) wurden die Modernisierungsmaßnahmen entsprechend einem Monitoring unterzogen und evaluiert. Die Modernisierung führte zu einer wesentlichen Erhöhung der Energieeffizienz des bestehenden Biomassekessels sowie einer Reduktion des fossilen Anteils im Energiemix. So konnte beispielweise der Anteil des Gaskessels in den Wintermonaten 2021 von rund 25 % auf unter 5 % im Januar bzw. von 15 % auf rund 0,5 % im Februar gesenkt werden.

Die Integration der Wärmepumpe führt im nächsten Schritt neben einer weiteren Leistungs- und Effizienzsteigerung auch zur Optimierung der Wärmerückgewinnung aus dem Rauchgas. Als Wärmequelle dient dabei die Rauchgaskondensation. Durch weitere Abkühlung des Rücklaufes der Rauchgaskondensation von derzeit ca. 52 °C auf ca. 35 °C durch die Wärmepumpe wird eine erhebliche Effizienzsteigerung der Rauchgaskondensation erreicht. Als Wärmesenke dient der Fernwärmerücklauf. Die Energie wird also im Kesselkreis zur Vorwärmung des Kesselwassers verwendet.

Die genutzte Wärmequelle für die Wärmepumpe ist generell für jede Art von KWK-Anlagen (unabhängig von der Primärenergie: Abfall, Gas, Biomasse etc.) mit entsprechender Rauchgasreinigung gegeben. Für die Modernisierungskonzepte gibt es ein hohes Multiplikationspotenzial in vielen österreichischen und europäischen Wärmesystemen.

KONTAKTDATEN:

Josef Bärnthaler

josef.baernthaler@fh-joanneum.at

Matthias Theissing

matthias.theissing@fh-joanneum.at

Werk-VI-Straße 46

8605 Kapfenberg

Session 4a

Green Energy Lab – Akzeptanz und Impact

**Visualisierung von Stromverbrauch, -erzeugung und
Netzeinspeisung – eine Untersuchung zum Verständnis von
Energiedaten**

Pfeiffer, Stolavetz, Maier / Forschung Burgenland GmbH / AT

**Individuelle Emotionen als Unterstützung zur Visualisierung
des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte**

Kremsner, Pfeiffer, Marhold, Maier / Forschung Burgenland GmbH / AT

**Ungleich verteilte Chancen der Energiewende –
Herausforderungen in der Energieforschung**

Ettwein, Werner / FH Technikum Wien / AT

Die Zukunft der Messtechnik FLUXUS® Energy



Eingriffsfreies Energiemonitoring Ideal zur ISO 50001 Auditierung

Permanente und portable Wärmemengenmessung von außen

- Die idealen Messsysteme zur temporären sowie permanenten Wärme- und Kältemengenbestimmung in Gebäuden, Anlagen und Fernwärmenetzen (Einbindung in ein Energiemanagementsystem)
- Installation ohne Prozessunterbrechung und absolut Wartungsfrei
- Höchste Nullpunktstabilität und Messgenauigkeit - auch bei niedrigsten Flussraten $<0,1$ m/s
- Als Produktvariante CA Energy auch zur Druckluftbilanzierung innerhalb der Gebäude- und Anlageninfrastruktur bestens geeignet

medon GmbH
office@medon.at | www.medon.at

medon
MESS.SYSTEME

Visualisierung von Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung – eine Untersuchung zum Verständnis von Energiedaten

C. Pfeiffer, C. Stolavetz, C. Maier

Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: In Austria, a considerable part of the energy supply is now generated from renewable energy resources such as hydropower, photovoltaics or wind power. At the private level, in particular the number of photovoltaic systems is increasing. Energy consumption at the household level has a significant impact on the environment. However, it is often difficult for end users to understand this complex issue. This in turn yields to less willingness to change their own energy consumption behavior. Therefore, end users need to be able to view and understand their own energy data to foster a sustainable change towards more efficient energy consumption behavior. In order to present relevant energy data in a comprehensible way to end users, special attention must be paid to proper designs and formats with respect to visualization. In addition, end users can be encouraged to reconsider their own household activities with time-dependent, high-resolution energy data visualizations and the illustration of peak loads. The current literature often refers to electricity consumption visualizations, but not to electricity generation with own photovoltaic systems and public grid feed-in. Hence, this paper addresses the private end users' comprehension of energy data visualizations with a particular focus on the different complexity levels of time-dependent electricity consumption, generation and feed-in. In an experimental online survey, the comprehension was tested with a total of $n = 538$ participants, considering the response time. Participants were randomly assigned to one of three groups, with different visualization types (line graph, bar chart, wind rose). Results show that comprehension differs depending on the visualization type and information density. For the visualization of mere electricity consumption, no significant differences in comprehension by visualization type are determined, although the wind rose achieves the best results for this. Comprehension of more complex visualizations is comparatively highest with line graphs, especially to visualize electricity consumption and generation. Furthermore, the personal energy affinity influences the comprehension of electricity consumption, generation and feed-in visualizations. Results can be used to optimize smart energy management systems in private households and foster end users to adopt a more sustainable energy consumption behavior.

1. EINLEITUNG

In Österreich wird mittlerweile ein erheblicher Teil der Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft, Photovoltaik oder Windkraft gewonnen. Auf privater Ebene nimmt vor allem die Anzahl an Photovoltaikanlagen zu. Dabei hat der Energieverbrauch auf Haushaltsebene einen wesentlichen Einfluss auf die Umwelt. Allerdings ist es für Endnutzer*innen oft schwierig, dieses komplexe Thema zu verstehen. Dies kann wiederum zu einer geringeren Bereitschaft, das eigene Energieverbrauchsverhalten zu ändern, führen. Daher müssen Endnutzer*innen ihre eigenen Energiedaten einerseits einsehen und andererseits verstehen können, um eine nachhaltige Änderung zu einem effizienteren Energieverbrauchsverhalten herbeizuführen.

Insgesamt wird in der vorhandenen Literatur im Kontext der Energiedatenvisualisierung im Zeitverlauf zwar häufig auf den Stromverbrauch Bezug genommen, nicht jedoch auf die Stromerzeugung mit eigenen Photovoltaikanlagen und die Stromeinspeisung in das öffentliche Netz. Dies führt zu der folgenden Forschungsfrage:

*Welcher Datenvisualisierungstyp zu Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung im Zeitverlauf führt bei privaten Endnutzer*innen zum besten Verständnis?*

2. THEORETISCHER HINTERGRUND

Die Fähigkeit zum Verstehen von Grafiken ist auf drei Ebenen verteilt. Die erste Ebene behandelt das *Lesen der Daten*. Es sollen also bestimmte Informationen in einer Visualisierung gefunden werden. Das beinhaltet beispielsweise die Fähigkeit, die Höhe eines Balkens in einem Balkendiagramm oder die Anzahl der Symbole eines bestimmten Typs in einem Symbolfeld abzulesen. Auf der zweiten Ebene sollte man in der Lage zum *Lesen zwischen den Daten* sein. Es gilt, Beziehungen in den Daten zu finden, die in einer Visualisierung dargestellt sind. Dies zeigt sich beispielsweise im Erkennen von Unterschieden zwischen verschiedenen Balken oder Symbolgruppen. Die höchste Ebene des Verständnisses von Visualisierungen spiegelt sich in der Fähigkeit zum *Lesen über die Daten hinaus* wider. Es gilt hierbei, Schlussfolgerungen aus den Daten zu ziehen und Vorhersagen zu treffen. Diese Verständnisebene ist notwendig um beispielsweise zukünftige Trends aus Liniendiagrammen zu prognostizieren oder beim Vergleich zweier Diagramme die Bedeutung von Skalenbereichen und Skalenbeschriftungen zu verstehen (Galesic & Garcia-Retamero 2011).

Um Informationen direkt aus einem Diagramm zu lesen, muss man zunächst die Konzepte der Diagrammgestaltung verstehen. Um die aus Diagrammen gelesenen Informationen zu verarbeiten, muss man weitere Vergleiche anstellen und Berechnungen durchführen. Um letztendlich zu verallgemeinern, vorherzusagen oder Trends zu erkennen, muss man die Informationen im Diagramm auf den Kontext der Situation beziehen (Friel et al. 2001).

Das Verständnis von Energiedaten steht in Zusammenhang mit der Bereitschaft, das eigene Energieverhaltensverhalten zu ändern (Fischer 2008). Die Art der Datenvisualisierung beeinflusst wiederum, in welchem Ausmaß Nutzer*innen ihren Stromverbrauch nachvollziehen können. Da je nach Art der Darstellung unterschiedliche Schlüsse über den individuellen Verbrauch gezogen werden, ist im Bereich der grafischen Visualisierung von relevanten Energiedaten für Endnutzer*innen insbesondere auf passende Designs und Formate zu achten (Herrmann et al. 2017).

Die aktuelle Literatur zeigt, dass für die Darstellung von Energiedaten am häufigsten einfache Balkendiagramme, Liniendiagramme oder Tortendiagramme verwendet werden (Grant 2016). Aufgrund ihrer Übersichtlichkeit führen diese Visualisierungstypen zu einem höheren Verständnis bei den Endnutzer*innen und werden ungewöhnlichen oder bildhaften Visualisierungen vorgezogen (Quispel & Maes 2014). Zudem spricht für eine Energiedatenvisualisierung im Zeitverlauf in Verbindung mit einer hohen zeitlichen Auflösung, dass Endnutzer*innen insbesondere mit der Darstellung von Spitzenlasten zum Hinterfragen ihrer Aktivitäten im Haushalt bewegt werden können (Costanza et al. 2012).

Für die Nutzung von traditionellen Formaten spricht die leichtere Verständlichkeit gegenüber modernen Formaten. Vergleiche des Energieverbrauchs innerhalb von homogenen Perioden (Stunden, Tagen, Wochen, Jahren) sind üblich und helfen den Endnutzer*innen, Lastspitzen zu identifizieren (Murgesan et al. 2015). Aus diesem Grund wurden in der gegenständlichen Arbeit die Visualisierungstypen Liniendiagramm, Säulendiagramm sowie Windrosendiagramm gewählt. Letzteres könnte aufgrund seiner grundsätzlichen Ähnlichkeit zu einem Tortendiagramm und der Assoziationsmöglichkeit mit einer Uhr eine Alternative zu bekannteren Visualisierungstypen darstellen.

3. METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Im Zuge einer experimentellen Online-Befragung wurde das Verständnis der Proband*innen zu Energiedatenvisualisierungen hinsichtlich des Stromverbrauchs, der Stromerzeugung und der Netzeinspeisung eines Mehrpersonen-Haushalts an einem Tag erhoben. Für das Experiment wurden Proband*innen über verschiedenste Kanäle sozialer Medien mittels Snowball-Sampling rekrutiert. Die Proband*innen wurden zufällig in eine von drei Gruppen (A, B oder C) zugeteilt, wobei jeder Gruppe ein anderer Visualisierungstyp präsentiert wurde (Linien-, Säulen- oder Windrosendiagramm). Innerhalb der Gruppen wurden drei unterschiedliche Ebenen der Informationsdichte (1. Stromverbrauch, 2. Stromverbrauch und -erzeugung, 3. Stromverbrauch, erzeugung und Netzeinspeisung) behandelt. Die Stimuli in diesem 3 (Visualisierungstyp) x 3 (Informationsdichte) Mixed-Design sind in der Abb. 1 dargestellt.

Das Verständnis wurde auf den drei Ebenen i) Lesen der Daten, ii) Lesen zwischen den Daten und iii) Lesen über die Daten hinaus abgefragt. Die Abfragen wurden unter Mitwirkung von Expert*innen in einem iterativen Prozess entwickelt. Auf ein ausgewogenes Verhältnis von Abfragetypen mit offener Antwortmöglichkeit, Single Choice- und Multiple Choice-Abfragen sowie eine gleichmäßige Verteilung der Ebenen zum Verständnis wurde geachtet. Zur besseren praktischen Durchführung wurden im Online-Befragungsinstrument jeweils zwei Abfragen pro Seite getätigt. Eine Auflistung der Abfragen, des Abfragetyps und der jeweiligen Ebene des Verständnisses ist in der Tab. 1 gegeben.

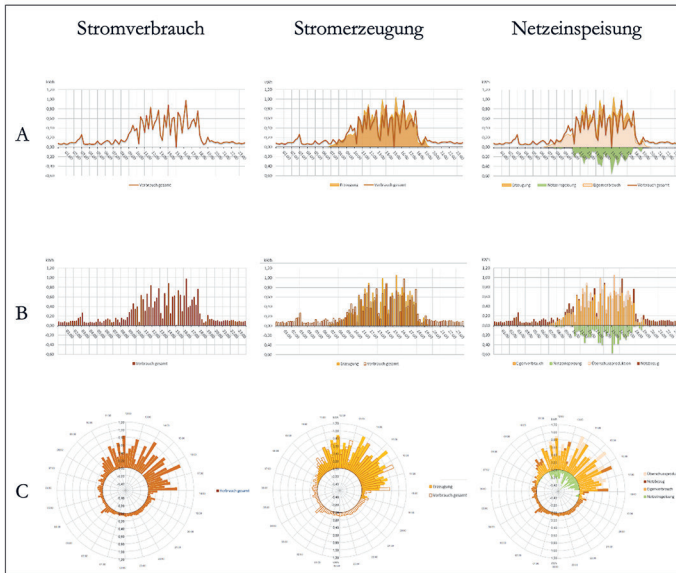


Abb. 1: Visualisierungstypen und Ebenen der Informationsdichte.

Die Proband*innen konnten für jede Antwort Punkte sammeln. Diese setzten sich zum einen aus der Richtigkeit der Antwort, zum anderen aus der Dauer der Beantwortung zusammen.

Für jede vollständig korrekte Antwort konnte 1 Punkt erreicht werden. Bei den offenen Antwortmöglichkeiten (F1, F4, F6) wurden praktikable Toleranzgrenzen gesetzt (F1: $\pm 0,10$ kWh, F4: $\pm 15\%$, F6: $\pm 15\%$), die ab dem Über- oder Unterschreiten zum vollständigen Punkteverlust bei der jeweiligen Abfrage führten. Ausgehend von der richtigen Antwort wurde das Punkteausmaß innerhalb des entsprechenden Toleranzbereichs linear reduziert. Falsch beantwortete Single Choice-Abfragen (F2, F5) wurden genauso mit 0 Punkten bewertet. Bei der Multiple Choice-Abfrage (F2) konnte für jede richtige Auswahl (bei 2 korrekten Auswahlmöglichkeiten) 0,50 Punkte erreicht werden, jede falsche Auswahl führte zu einem Verlust von 0,50 Punkten.

Als zweites Kriterium wurde die Dauer der Beantwortung berücksichtigt. Für eine maximale Beantwortungsdauer von 45 Sekunden wurde 1 Punkt vergeben, im Bereich 45 Sekunden bis 180 Sekunden wurde das Punkteaßmaß linear reduziert, eine Beantwortungsdauer von mehr als 180 Sekunden führte zum vollständigen Punkteverlust. Die erreichten Punkte für Richtigkeit und Dauer wurden schlussendlich miteinander multipliziert, sodass ein finaler Score zum Verständnis pro Abfrage resultierte. Die zur jeweiligen Ebene der Informationsdichte zugehörigen Abfragen wurden im Anschluss mithilfe des arithmetischen Mittels zusammengefasst.

Tab. 1: Abfragen zum Verständnis, Abfragetyp und zugehörige Ebene.

Abfrage	Typ	Ebene	
Stromverbrauch			
F1	Wie hoch schätzen Sie den Verbrauch zwischen 03:00 und 03:15 Uhr?	<i>Offen</i> ^a	Lesen der Daten
F2	In welchem Zeitraum tritt die Verbrauchsspitze des Tages auf?	<i>Single Choice</i>	Lesen zwischen den Daten
Stromverbrauch und -erzeugung			
F3	In welchen der folgenden Zeiträume wird stets mehr Energie erzeugt als verbraucht?	<i>Multiple Choice</i>	Lesen zwischen den Daten
F4	Bitte schätzen Sie, wie viel % des Energieverbrauchs zwischen 09:00 Uhr und 10:00 Uhr durch PV-Erzeugung abgedeckt wird.	<i>Offen</i> ^b	Lesen über die Daten hinaus
Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung			
F5	In welchem Zeitraum tritt die Spitze der Netzeinspeisung auf?	<i>Single Choice</i>	Lesen der Daten
F6	Bitte schätzen Sie, wie viel % der Eigenverbrauch am Gesamtverbrauch an diesem Tag ausmacht („Autarkiegrad“).	<i>Offen</i> ^b	Lesen über die Daten hinaus

^a Angabe in kWh, ^b Angabe in %.

Da wesentliche Ausreißer in den Daten vorhanden sind, wurden für die Datenauswertung zunächst die tatsächlichen Antworten der Proband*innen sowie die Beantwortungsdauern mit robusten deskriptiven Methoden (Mediane, Quartilsabstände, relative Häufigkeiten) dargestellt. Etwaige Unterschiede zwischen den Visualisierungstypen und der Informationsdichte wurden schlussendlich anhand der resultierenden Scores betrachtet. Diese einheitlichen Vergleichswerte wurden im Rahmen einer Kovarianzanalyse mit Messwiederholung geprüft. Als Einflussfaktor diente hierfür die persönliche Energieaffinität. Diese wurde anhand von vier Aussagen auf jeweils fünf Ausprägungen von $1 = \text{trifft gar nicht zu}$ bis $5 = \text{trifft voll und ganz zu}$ abgefragt und in eine Skala „Energieaffinität“ zusammengefasst.

4. ERGEBNISSE

Insgesamt haben sich $n = 538$ Proband*innen am Online-Experiment beteiligt. Die Befragten sind im Durchschnitt 43,21 Jahre alt ($SD = 16,61$). 55,07 % sind männlich und 44,77 % weiblich. Eine Person hat ihr Geschlecht als „divers“ angeführt. Hinsichtlich des höchsten Bildungsniveaus geben 11,37 % an, maximal einen Lehrabschluss zu haben, während 10,12 % eine berufsbildende mittlere Schule abgeschlossen haben. Einen Maturaabschluss haben 32,87 % vorzuweisen, die verbleibenden 45,64 % haben einen Hochschulabschluss. Die Befragten leben überwiegend in einem Zweipersonenhaushalt (39,23 %). 13,13 % geben an, allein zu leben. 22,07 % leben in einem Drei-Personen-Haushalt, während Haushalte mit vier oder mehr Personen ebenfalls recht häufig vorkommen (25,57 %). Die Energieaffinität ($\alpha = 0,78$) der Proband*innen ist im Schnitt moderat ausgeprägt ($MW = 3,58$; $SD = 1,07$).

Tab. 2: Gegenüberstellung korrekter und tatsächlicher Antworten.

	Tatsächliche Antwort		Korrekte Antworten	
	Med ^a	(IQR ^b)	Anteile	Werte
F1 ^c	0,25	(0,14)		0,27
F2 ^d			87,92 %	16-17 Uhr
F3 ^e			36,69 %	11-12 Uhr, 15-16 Uhr
F4 ^f	66,00	(25,00)		65,14
F5 ^d			86,12 %	15-16 Uhr
F6 ^f	68,00	(30,00)		73,27

^a Median, ^b Quartilsabstand, ^c Werte in kWh, ^d Single Choice, ^e Multiple Choice, ^f Werte in %.

In der Tab. 2 sind die korrekten Antworten den statistischen Werten tatsächlich gegebener Antworten gegenübergestellt. So befinden sich die Angaben durchschnittlicher Proband*innen bei den offenen Abfragen ($Med_{F1} = 0,25$, $Med_{F4} = 66,00$, $Med_{F6} = 68,00$) sehr nahe an den korrekten Antworten ($F1 = 0,27$, $F4 = 65,14$, $F6 = 73,27$). Auch die Single Choice-Abfragen ($F2$, $F5$) wurden von 87,92 % ($F2$) bzw. 86,12 % ($F5$) häufig richtig beantwortet. Schwieriger war die Multiple Choice-Abfrage ($F3$) – hier konnten nur 36,69 % der Proband*innen die beiden korrekten Antworten anführen.

Während durchschnittliche Proband*innen die Abfragen mit der niedrigsten Informationsdichte zum bloßen *Stromverbrauch* in 1:09 Minuten ($IQR = 0:47$) beantwortet haben, wurden für die Abfragen auf der Ebene *Stromverbrauch und -erzeugung* 1:27 Minuten ($IQR = 1:04$) benötigt. Bei der höchsten Informationsdichte *Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung* benötigten durchschnittliche Proband*innen 1:12 Minuten ($IQR = 1:03$), um die Fragen zu beantworten (Tab. 3).

Tab. 3: Beantwortungsdauern nach Informationsdichte.

Informationsdichte	Med ^a	(IQR ^b)
Stromverbrauch	1:09	(0:47)
Stromverbrauch und -erzeugung	1:27	(1:04)
Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung	1:12	(1:03)

^a Median, ^b Quartilsabstand, Beantwortungsdauern in Minuten.

Bei Betrachtung der endgültigen Scores sind einige Unterschiede festzustellen. Zunächst fällt auf, dass die höchsten Scores auf der niedrigsten Ebene der Informationsdichte erzielt werden. So werden Visualisierungen zum bloßen Stromverbrauch anhand von Liniendiagrammen ($M = 0,45$, $SD = 0,26$), Säulendiagrammen ($M = 0,45$, $SD = 0,25$), aber auch Windrosendiagrammen ($M = 0,51$, $SD = 0,28$) vergleichsweise gleich gut verstanden.

Auf der nächsthöheren Ebene der Informationsdichte ist die eigene Stromerzeugung in der Visualisierung dem Stromverbrauch ergänzt. Hier werden die geringsten Scores erreicht, insbesondere bei Visualisierung mittels Säulen ($M = 0,2$, $SD = 0,19$) und Windrosen ($M = 0,21$, $SD = 0,20$).

Die höchste Informationsdichte enthält zusätzlich noch Informationen zur Einspeisung in das Stromnetz. Bei diesen Visualisierungen werden wiederum höhere Scores erreicht. Sowohl Liniendiagramme ($M = 0,42$, $SD = 0,27$), als auch Säulendiagramme ($M = 0,41$, $SD = 0,24$) werden auf dieser Ebene ähnlich gut verstanden. Einzig die Windrose ($M = 0,35$, $SD = 0,25$) führt hier zu einem schwächeren Ergebnis (Tab. 4).

Tab. 4: Vergleich der Scores.

Informationsdichte	Linien	Säulen	Windrose
n	164	169	168
Stromverbrauch	0,45 (0,26)	0,45 (0,25)	0,51 (0,28)
Stromverbrauch und -erzeugung	0,33 (0,24)	0,22 (0,19)	0,21 (0,20)
Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung	0,42 (0,27)	0,41 (0,24)	0,35 (0,25)

Score-Mittelwerte im Bereich [0, 1], Standardabweichungen in Klammern.

Beim Visualisierungstyp sind signifikante, aber eher schwache Unterschiede gegeben ($F(2, 497) = 3,28$, $p = 0,039$, $\eta^2 = 0,013$). Im Mittel sind Liniendiagramme somit etwas verständlicher im Vergleich zu Säulendiagrammen und Windrosen. Wie oben bereits angeführt, ist ein moderat ausgeprägter Haupteffekt hinsichtlich Informationsdichte festzustellen ($F(1,96, 972,22) = 29,98$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,057$). Zudem ist eine Wechselwirkung zwischen Visualisierungstyp und Informationsdichte der Visualisierung vorhanden ($F(3,91, 972,22) = 10,73$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,041$). Insbesondere auf der Ebene Stromverbrauch und -erzeugung wird dieser schwache, aber vorhandene Effekt beim Liniendiagramm am meisten deutlich. Das Windrosendiagramm weist bei der niedrigsten Informationsdichte die höchsten Scores auf, wohingegen es bei der höchsten Informationsdichte die niedrigsten Scores erreicht (Abb. 2).

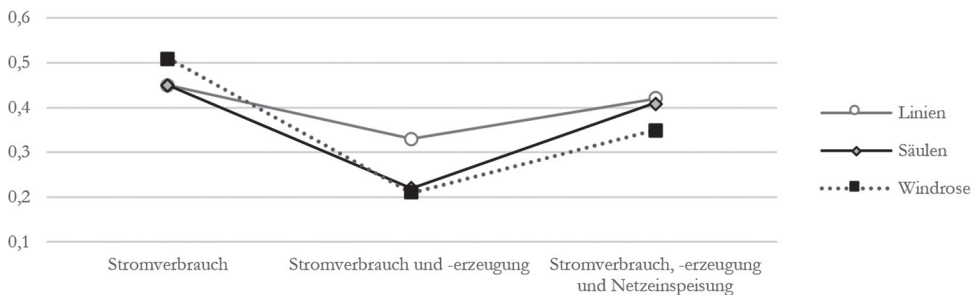


Abb. 2: Randmittel der Scores nach Visualisierungstyp und Informationsdichte.

Die genannten Effekte sind im Rahmen der Kovarianzanalyse bereits um die Energieaffinität korrigiert ($F(1, 597) = 12,23$, $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,024$). Zudem steht das Verständnis verschiedener Ebenen der Informationsdichte in Wechselwirkung mit der Energieaffinität ($F(1,96, 972,22) = 4,68$, $p = 0,01$, $\eta^2 = 0,009$). Die Ergebnisse der Kovarianzanalyse mit Messwiederholung sind in der Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Ergebnisse der Kovarianzanalyse mit Messwiederholung.

	df ^c	F	Effektstärke η^{2d}
Visualisierungstyp ^a	2,00	3,28*	0,013
Informationsdichte ^b	1,96	29,98***	0,057
Energieaffinität ^a	1,00	12,23**	0,024
Interaktion (Typ x Ebene) ^b	3,91	10,73***	0,041
Interaktion (Ebene x Affinität) ^b	1,96	4,68*	0,009

^a mit 497 Freiheitsgraden (Fehler), ^b mit 972,22 Freiheitsgraden (Fehler), ^c Freiheitsgrade (Merkmal) nach Greenhouse-Geisser-Korrektur, ^d 0,010 kleiner Effekt, 0,060 mittlerer Effekt, 0,140 großer Effekt, + $p < 0,100$, * $p < 0,050$, ** $p < 0,010$, *** $p < 0,001$.

5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

In dieser Arbeit wurde das Verständnis von Visualisierungen zu Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung im Rahmen einer experimentellen Online-Befragung abgetestet. Für dieses Experiment wurden die Visualisierungstypen Liniendiagramm, Säulendiagramm sowie Windrosendiagramm gewählt.

In der gegenständlichen Arbeit führen Linien- und Säulendiagramme mit zunehmender Informationsdichte zu höherem Verständnis, womit die Ergebnisse von Quespel & Maes (2014) bestätigt werden können. Das für Energiedatenvisualisierungen eher als unüblich einzustufende Windrosendiagramm scheint für Darstellungen mit geringer Komplexität noch gut verständlich zu sein. Somit käme es als mögliche Alternative für den reinen Stromverbrauch in Frage. Jedoch büßt die Windrose im Vergleich zu Linien- und Säulendiagrammen mit zunehmender Informationsdichte an Verständlichkeit ein.

Hinsichtlich der Informationsdichte der Datenvisualisierung konnten merkbare Unterschiede festgestellt werden. Erstens ist bei Betrachtung des bloßen Stromverbrauchs – relativ unabhängig vom Visualisierungstyp – vergleichsweise ein hohes Verständnis gegeben. Zweitens ist ein deutlicher Effekt zu vernehmen, sobald eine zusätzliche Information – in diesem Fall die Stromerzeugung – der Visualisierung ergänzt wird. Drittens kann aus dem höheren Verständnis im Rahmen der Visualisierung von Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung ein gewisser Lerneffekt abgeleitet werden. Den Proband*innen wurde die vergleichsweise komplexeste Visualisierung zuletzt gezeigt.

Allenfalls liefern die Ergebnisse dieser Arbeit wertvolle Erkenntnisse, eine höhere Nutzer*innenfreundlichkeit bei smarten Energiemanagementsystemen privater Haushalte zu erreichen und so einen zusätzlichen Treiber zu einem nachhaltigen, effizienten Energieverbrauchsverhalten zu schaffen.

6. DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2018 durchgeführt.

LITERATUR

- Costanza E., Ramchurn S.D. & Jennings N.R. (2012) Understanding Domestic Energy Consumption through Interactive Visualisation: A Field Study. In: Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing. Pittsburgh, USA.
- Fischer C. (2008) Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy? *Energy Efficiency* 1(1), 79–104.
- Friel S.N., Curcio F.R. & Bright G.W. (2001) Making Sense of Graphs: Critical Factors Influencing Comprehension and Instructional Implications. *Journal for Research in Mathematics Education* 32(2), 124.
- Galesic M. & Garcia-Retamero R. (2011) Graph literacy: a cross-cultural comparison. *Medical Decision Making* 31(3), 444–457.
- Grant W. (2016) Energy Data Visualization Requires Additional Approaches to Continue to be Relevant in a World with Greater Low-Carbon Generation. *Frontiers in Energy Research* 4, 33.
- Herrmann M.R., Brumby D.P., Oreszczyn T. & Gilbert X.M.P. (2017) Does data visualization affect users' understanding of electricity consumption? *Building Research & Information* 46(3), 238-250.
- Murugesan L. K., Hoda R. & Salcic Z. (2015) Design criteria for visualization of energy consumption: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society* 18, 1–12.
- Quispel A. & Maes A. (2014) Would you prefer pie or cupcakes? Preferences for data visualization designs of professionals and laypeople in graphic design. *Journal of Visual Languages and Computing* 25, 107-116.

KONTAKTDATEN:

Christian Pfeiffer

Campus 1

7000 Eisenstadt

Email: christian.pfeiffer@forschung-burgenland.at

Individuelle Emotionen als Unterstützung zur Visualisierung des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte

T.P. Kremsner, C. Pfeiffer, N. Marhold, C. Maier
Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: In order to positively contribute to the energy transition, private customers require detailed information on the power consumption of their own household appliances. Home Energy Management Systems (HEMS) provide a closer look at the electricity consumption of a household. HEMS usually show in the form of graphs how high the respective consumption of household appliances is per day, month or year. Several studies show that visualizations of electricity consumption must be as easy to understand as possible for users. This is especially true for those users who have been less concerned with the topic of energy. Visualizations of electricity consumption must therefore be designed in a user-friendly way and evoke positive emotions in order to increase the intention to use them. Therefore, the present study aims to assign individual emotions to common visualizations of electricity consumption. For this purpose, a usability test for different types of energy data visualizations was conducted with 50 respondents. The subjects had to read data on the consumption of household appliances from various visualizations and answer several questions about it. During the test, the subjects' faces were filmed and evaluated with an automatic facial expression analysis. Positive, negative, or neutral facial expressions could be assigned to visualizations during task processing. The facial expression analysis was supplemented by eye-tracking data to determine which facial expression occurred while viewing the different graphics. The results of the study show that respondents prefer bar charts, as they are most familiar with this type of presentation. In particular, people without detailed knowledge of energy topics find it more difficult to obtain the desired information in onion charts, wind roses or area charts. The data of the facial expression analysis confirm the statements of the participants. It is evident that familiar chart types (for instance bar charts/ring charts) trigger the least negative facial expressions. Other types of visualizations, which are rather unfamiliar to the test persons, trigger a lot of negative emotions in comparison. A limitation of this study is that potential users of HEMS with detailed knowledge on energy-related topics might have other preferences regarding diagram types. Nevertheless, this study provides comprehensive insights into how to make visualizations of electricity consumption accessible to a broader audience.

1. EINLEITUNG

Home Energy Management Systeme (HEMS) geben einen detaillierten Einblick in den Stromverbrauch eines Haushalts. Dabei zeigen HEMS zumeist in Form von Grafiken, wie hoch der jeweilige Verbrauch der Haushaltsgeräte pro Tag, Monat oder Jahr ist. Diese Auskunft ist für Privatpersonen äußerst wichtig, da sie Stromfresser im eigenen Haushalt aufdecken und somit ihren Stromverbrauch senken können. Insgesamt sollen HEMS einen positiven Beitrag zur Energiewende bewirken (Schwartz et al. 2015).

Eine Vielzahl von Studien zeigt, dass für die Nutzer*innen die Darstellung vom Stromverbrauch möglichst einfach nachvollziehbar sein muss. Dies betrifft vor allem jene Nutzer*innen, die keine spezifische technische Ausbildung haben oder sich bisher weniger mit dem Thema Energie auseinandergesetzt haben. Weiters müssen HEMS positive Emotionen auslösen, um die Nutzungsintention nachhaltig zu steigern. Im Falle von negativen Emotionen (zum Beispiel Frustrationen) bei der Nutzung werden

Nutzer*innen langfristig nicht motiviert sein, den Energieverbrauch einzusehen und dementsprechend den Stromverbrauch im Haushalt nicht optimieren (Rist & Masoodian 2019).

Diese Studie setzt sich daher zum Ziel, entsprechende Emotionen zu gebräuchlichen Veranschaulichungen zum Stromverbrauch zuzuordnen. Um das Forschungsanliegen zu beantworten, wurde folgende Forschungsfrage definiert:

Welche Emotionen lösen Visualisierungen des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte aus?

Aus dieser Forschungsfrage lassen sich zwei Sub-Forschungsfragen ableiten:

- *Welche Visualisierungen des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte lösen die meisten positiven Emotionen bei Nutzer*innen aus?*
- *Welche Visualisierungen des Stromverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte lösen die meisten negativen Emotionen bei Nutzer*innen aus?*

2. THEORETISCHER HINTERGRUND

Die bisherige Forschung hat bereits verschiedene Formen von *Home Energy Management Systemen* (abgekürzt: „HEMS“) und *Energiedatenvisualisierungen* untersucht. Die spezifischen Präferenzen und Nutzungsmotive der Verbraucher*innen können je nach Personengruppe sehr abweichen und müssen daher genau untersucht werden (Fischer 2008).

Für ein besseres Verständnis des persönlichen Verbraucherverhaltens ist die Form der angezeigten Energiedaten entscheidend (Herrmann et al. 2017). Die verschiedenen Formen der Visualisierung können von traditionellen, eher schlichten Diagrammen bis hin zu modernen, künstlerisch gestalteten Grafiken variieren. Dem Großteil der Menschen gefallen zwar moderne und künstlerische Grafiken besser, jedoch erfordern diese einen höheren kognitiven Aufwand, um diese Art von Diagramm zu lesen und zu verstehen. Infolgedessen sind solche Grafiken oft schwieriger zu interpretieren als Grafiken ohne zusätzliche künstlerische Verzierung (Murugesan et al. 2015). Bateman et al. (2010) untersuchten den Effekt von künstlerischen Komponenten in Energievisualisierungen auf das Verständnis und die Erinnerung von Nutzer*innen. Die Ergebnisse zeigen, dass Nutzer*innen visuelle Verzierungen in Diagrammen gefallen und als attraktiv bewerten. Personen können sich sogar nach längerer Zeit besser an Diagramme mit Verzierungen erinnern. Es gibt bisher jedoch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse dafür, dass die Verwendung von künstlerischen Verzierungen in der Datenvisualisierung das Verständnis erhöht. Quispel und Maes (2014) zufolge fördern Standard-Visualisierungstypen wie Balken-, Linien- oder Tortendiagramme Übersichtlichkeit und Verständnis eher als ungewöhnliche, abweichende oder bildhafte Visualisierungstypen. Dies könnte der Grund sein, warum die Verwendung dieser Art von Visualisierungen am häufigsten für die Darstellung von Energiedaten verwendet wird (Grant 2016). Auch Fischer (2008) zeigte, dass Verbraucher*innen diese Standardtypen bevorzugen. Insbesondere werden Kreisdiagramme bevorzugt, um einzelne Geräte miteinander zu vergleichen, vertikale Balken, um Zeiträume gegenüberzustellen und horizontale Balken oder Liniendiagramme, um den Energieverbrauch von verschiedenen Haushalten nebeneinander zu betrachten. Auch Eye-Tracking Untersuchungen lassen vermuten, dass man Informationen in bekannten Visualisierungsformen wesentlich schneller auffinden kann. Hierbei hat sich unter anderem herausgestellt, dass Balkendiagramme unter bestimmten Voraussetzungen zum schnelleren Auffinden von Daten führen können als Flächen- oder Liniendiagramme (Goldberg & Helfman 2011).

Weitere Studien (beispielsweise Fang et al. 2019). haben mithilfe einer Umfrage herausgefunden, dass Emotionen bei Designpräferenzen und der Nutzungsintention von grafischen Darstellungen eine große Rolle spielen. Neben Umfragen kann man auch mithilfe von automatischen Gesichtsausdrucksanalysen feststellen, wie positiv oder negativ diverse Stimulusmaterialien bei Proband*innen ankommen. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Studie wurde jedoch keine einzige Studie identifiziert, wel-

che diese Methodik zur Evaluierung von Energievisualisierungen angewandt hat. Daher untersucht die vorliegende Studie diese Forschungslücke im Detail.

3. METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Um die Nutzerfreundlichkeit und die Designpräferenzen von Energievisualisierungen herausfinden zu können, wurde in dieser Studie eine Methodenkombination aus Eye-Tracking und der Facial Expression Analysis eingesetzt. Dabei mussten die Proband*innen den Stromverbrauch von Haushaltsgeräten in verschiedenen Diagrammtypen ablesen, wobei die Daten mit unterschiedlichen Visualisierungen dargestellt wurden. Weiters mussten sie im Anschluss einige Fragen zu den Energievisualisierungen und ihren Designpräferenzen beantworten. Im Rahmen der Studie konnten 50 Freiwillige ohne besonderem Hintergrundwissen zu Energiethemen über eine Studierendengruppe der Fachhochschule Burgenland rekrutiert werden. Die Studie wurde mit dem Eye-Tracker Tobii Pro Nano im Eye-Tracking Labor der Fachhochschule Burgenland durchgeführt.

Danach wurden den Proband*innen diverse gängige Energiedatenvisualisierungen gezeigt (Balken-, Säulen-, Ring-, Flächen-, Zwiebel- und Windrosendiagramme). Dabei wurden in zwei verschiedenen Durchgängen jeweils drei Visualisierungstypen mit disaggregierten Stromverbräuchen pro Woche oder im Tagesverlauf vorgelegt (siehe Abb. 1). Aus den drei verschiedenen Energievisualisierungen musste jeweils ein hinsichtlich Design und Verständlichkeit bevorzugter Visualisierungstyp (A, B oder C) gewählt werden. Während der Durchführung wurden die Gesichter der Proband*innen gefilmt und im Anschluss mit einer *automatischen Gesichtsausdrucksanalyse* mithilfe des Facial Action Coding Systems (FACS) ausgewertet. Hierbei werden die Bewegungen und die Position von verschiedenen Gesichtselementen (sogenannte *Aktionseinheiten*) wie zum Beispiel Augenbrauen, Mund und Augen analysiert. Diese Daten liefern Hinweise zur emotionalen Lage der Proband*innen und können in positive oder negative Emotionen unterteilt werden.

Ergänzt wurde die Gesichtsausdrucksanalyse mit der Methode *Eye-Tracking*, welche die Blickbewegungen der Proband*innen misst. Um feststellen zu können, bei welchen Diagrammartentypen welche Gesichtsausdrücke aufgetreten sind, waren diese Daten unerlässlich. Dazu wurden die verschiedenen Grafiktypen als sogenannte *Areas of Interest* definiert, die es ermöglichen, detaillierte Eye-Tracking Kennzahlen zum jeweiligen Bereich (zum Beispiel Anzahl der Fixationen, Zeit bis zur ersten Fixation, etc.) anzeigen zu lassen. Somit konnte festgestellt werden, wie lange eine Grafikart angesehen wurde und wie positiv oder negativ dabei der jeweilige Gesichtsausdruck war. Zusätzlich wurden *Heat Maps* bzw. *Shadow Maps* erstellt. Bei einer *Heat Map* wird farblich auf einem Stimulus markiert, wohin die Proband*innen am häufigsten gesehen haben (rote Bereiche werden am längsten angesehen, gefolgt von gelben und danach grünen Bereichen). Die sogenannte *Shadow Map* ist der *Heat Map* ähnlich, nur werden hier die aufmerksamkeitsstarken Zonen dunkel markiert (Bojko 2013; iMotions 2017).

Erhoben und ausgewertet wurden die Daten mithilfe der Software iMotions 9.0.

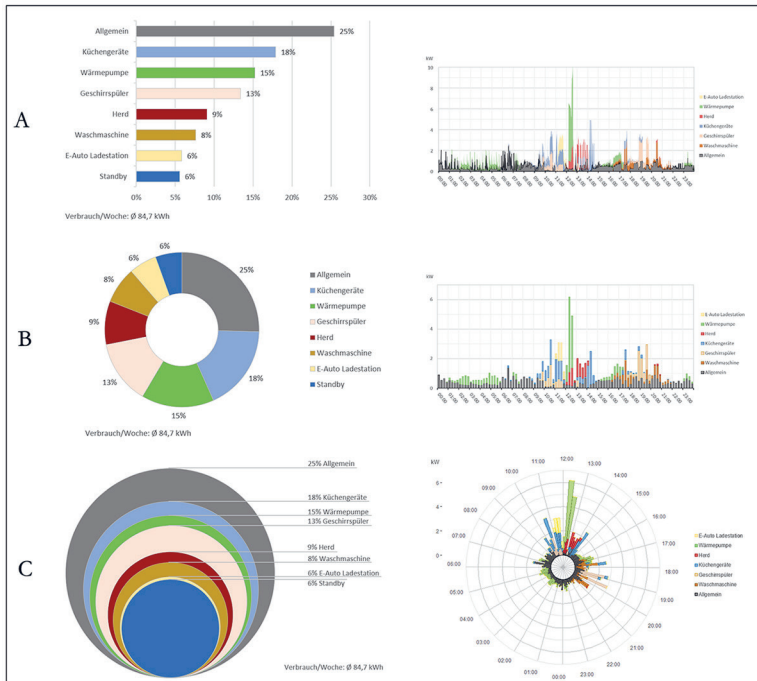


Abb. 1: Untersuchte Visualisierungstypen zur Emotionsmessung.

4. ERGEBNISSE

Innerhalb der Studie wurden 50 Studienteilnehmer*innen befragt. Bei der Studie waren 27 Personen weiblich und 23 männlich. Die Proband*innen waren durchschnittlich 31 Jahre alt (± 13 Jahre) und haben sich bisher weniger mit dem Thema Energie befasst.

Tab. 1 veranschaulicht die Gesichtsausdrücke beim Begutachten diverser Energievisualisierungen in %. Im ersten Teil der Tabelle wird dabei auf die Visualisierungen im Tagesverlauf näher eingegangen, im zweiten Teil sieht man einen Vergleich der Energievisualisierungen pro Woche. Bei den Visualisierungen zum Tagesverbrauch sieht man deutlich, dass die negativen Emotionen bei der *Windrose* in Summe am stärksten ausfallen (9,53 % aller Gesichtsausdrücke), gefolgt von den *Säulendiagrammen* (8,86 %) und dem *Linien- bzw. Flächendiagramm* (7,53 %). Bemerkenswert ist, dass das Windrosendiagramm gleichzeitig auch die meisten positiven Emotionen hervorgerufen hat (8,85 %, siehe Spalte „Joy“).

Bei den Visualisierungen zum Wochenverbrauch (Abb. 3) ergibt sich ein ähnliches Stimmungsbild. Hier muss betont werden, dass das *Zwiebeldiagramm* in Summe die meisten negativen Gesichtsausdrücke in der Studie ausgelöst hat (17,07 %), gefolgt von dem *Balkendiagramm* (11,43 %) und dem *Ringdiagramm* (9,02 %). Das *Zwiebeldiagramm* löst in fast allen Kategorien von negativen Emotionen

(Anger, Contempt, Fear, Sadness) die stärksten negativen Emotionen aus. Weiters werden die wenigsten positiven Emotionen bei dieser Art von Diagramm ausgelöst (Joy). Die Emotionsdaten deuten somit darauf hin, dass das Windrosen- bzw. Zwiebelendiagramm in ihrer Kategorie (Tages- bzw. Wochenverbrauch) die meisten negativen Emotionen auslösen und somit weniger gut bei den Proband*innen ankommen.

Tab. 1: Gesichtsausdrücke in % beim Begutachten von Energievisualisierungen

Grafikart	Surprise	Joy	Anger	Contempt	Disgust	Fear	Sadness	Negative. Emotionen Gesamt
Visualisierungen vom Tagesverbrauch								
Säulen	1,12	8,28	1,65	1,85	1,15	1,34	2,88	8,86
Linien/Flächen	1,81	8,39	1,04	1,13	1,01	1,23	3,12	7,53
Windrose	1,55	8,85	1,33	1,61	1,29	0,78	4,52	9,53
Visualisierungen vom Wochenverbrauch								
Balken	2,23	9,19	1,56	4,10	1,37	2,31	2,09	11,43
Zwiebel	2,76	8,37	3,30	5,71	1,24	2,75	4,06	17,07
Ring	3,29	11,09	1,80	2,17	1,01	1,64	2,40	9,02

In Abb. 2 kann man erkennen, dass das Windrosendiagramm vor allem bei der Emotion „Sadness“ (zu Deutsch „Traurigkeit“) wesentlich höher ausfällt als die anderen Diagrammtypen. Sonst fallen die Emotionen meist sehr ähnlich aus und unterscheiden sich nur um wenige Prozentpunkte.

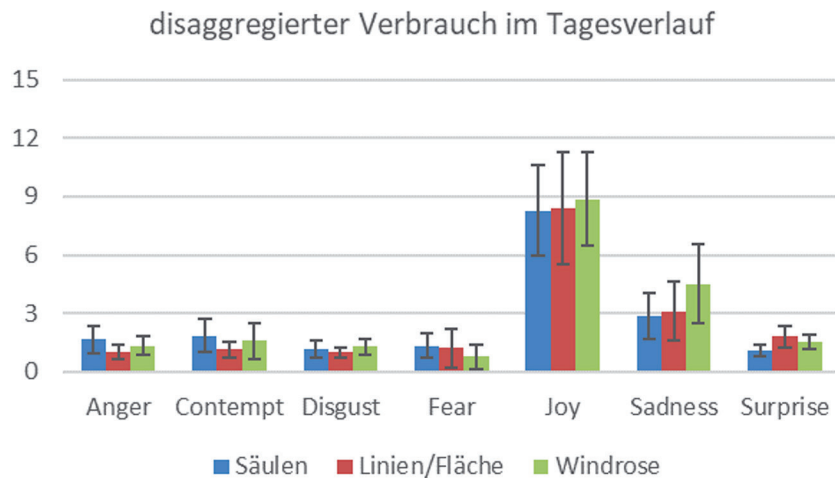


Abb. 2: Gesichtsausdrücke als Reaktion auf unterschiedliche Stromverbrauchsvisualisierungen vom Tagesverlauf in %, n=50

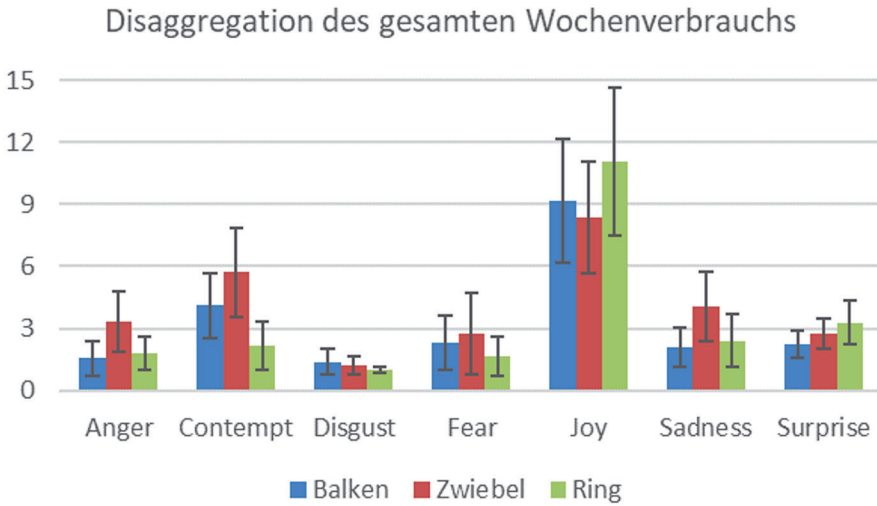


Abb. 3: Verschiedene Gesichtsausdrücke als Reaktion auf unterschiedliche Stromverbrauchsvisualisierungen für eine Woche in %, n=50

Auch die Eye-Tracking Daten zeigen ein dazu passendes Bild. In der Shadow Map in Abb. 4 ist klar ersichtlich, dass die Proband*innen zwar alle Grafiken angesehen haben, aber bei der Wahl der bevorzugten Grafik rechts unten lediglich die Optionen 1 (Balkendiagramm) und 2 (Flächendiagramm) näher angesehen haben.



Abb. 4: Shadow Map zur Visualisierung vom Tagesverbrauch (dunkel markierte Bereiche wurden am häufigsten fixiert), n=50

Auch die Visualisierungen vom Wochenverbrauch zeigen ein ähnliches Bild (siehe Abb. 5 – Heat Map der Wochenverbrauchsvisualisierungen). Obwohl alle Grafiken grundsätzlich angesehen wurden,

lag die Entscheidung meist zwischen Grafik 1 und 2, entschieden hat man sich in 4 von 5 Fällen für Grafik 1 und somit dem Balkendiagramm. Grafik 3 wurde von einem Fünftel der Proband*innen ausgewählt, lediglich das Zwiebelendiagramm (Grafik 2) wurde nie als Favorit markiert.

Auch in der Heat Map ist erkennbar, dass die Optionen 2 bzw. 3 nicht oft angesehen wurden und daher nicht in der engeren Auswahl bei der Entscheidung für eine der Diagrammtypen war.



Abb. 5: Heat Map zur Visualisierung vom Wochenverbrauch (rot markierte Bereiche wurden am häufigsten fixiert, gefolgt von gelben und grünen Bereichen), n=50

Auch in den qualitativen Kurzinterviews, die nach der Studie durchgeführt worden sind, können die bisherigen Ergebnisse bestätigt werden.

Die Proband*innen erwähnten in Bezug auf das *Windrosendiagramm* in den meisten Fällen, dass Ihnen diese Visualisierungsform weniger geläufig ist und sie eher *bekanntere Darstellungsformen* bevorzugen (Balken-, Linien- oder Flächendiagramm). Eine Probandin sagte hierzu in Zusammenhang mit dem *Windrosendiagramm*: „Ich bin doch keine Wissenschaftlerin, ich kann diese Grafik nicht verstehen.“ Demgegenüber wurden Balken-, Linien-, oder Flächendiagramme wesentlich besser von der Zielgruppe akzeptiert. „Ich mag Balkendiagramme wesentlich mehr als das *Windrosendiagramm*, dieses kenne ich aus diversen Anwendungen und von verschiedenen Berichten und dies kann ich daher einfach verstehen. Das *Windrosendiagramm* wiederum kann ich nicht einfach interpretieren, da muss ich mich einmal zurechtfinden.“ In Bezug auf das *Säulendiagramm* im Vergleich zum *Linien- oder Flächendiagramm zum Tagesverlauf* wurde hin und wieder genannt (von ca. einem Fünftel der Proband*innen), dass das letztere visuell besser ankommt, weil zu viele Säulen nebeneinander nicht mehr ansprechend sind. Generell werden Säulen zwar bevorzugt, aber nur, wenn es sich um weniger als zehn Säulen handelt. Da in diesem Fall der gesamte Tagesverbrauch visuell dargestellt wird, ist das Flächendiagramm für manche Proband*innen sinnvoller. Bei den *Energievisualisierungen zum Wochenverbrauch* nannten die Proband*innen auf Rückfrage, dass das *Zwiebelendiagramm* weder visuell ansprechend ist, noch leicht nachvollziehbar sei. Keine der Proband*innen nannte im Interview, dass ihm/ihr das Diagramm gefallen würde. Eine Probandin nannte in diesem Zusammenhang: „Ich finde diese Art von Grafik überhaupt nicht schön, ich

weiß auch nicht, was die unterschiedlichen Ringe darstellen sollen. Diese Art von Grafik würde ich mir nicht wünschen“. Das *Ringdiagramm* wurde von einem kleinen Teil der Proband*innen als sehr gut beurteilt (ca. ein Fünftel bevorzugte diese Art von Diagramm), der Rest entschied sich im direkten Vergleich für das *Balkendiagramm*, da ihnen dieses am geläufigsten ist.

5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Als Schlussfolgerung für diese Studie können die Ergebnisse aus bisherigen Studien bestätigt werden, dass Studienteilnehmer*innen einfache Energievisualisierungen bevorzugen, dabei sollten vor allem Balken- und Säulendiagramme vermehrt zur Anwendung kommen. Die Mehrheit der Proband*innen hatte kein besonderes Vorwissen zu Energiethemen. Daher kann argumentiert werden, dass sich diese Personengruppe einfache Grafiken wünscht, um sich mit dem Energiethema vertraut zu machen. Die Ergebnisse stimmen mit vorherigen Studienerkenntnissen überein, in denen ähnliche Erkenntnisse erzielt wurden. Bei der Entwicklung von HEMS sollte daher der Fokus auf diesen herkömmlichen Datenvisualisierungstypen gelegt werden. Von Grafiken wie Zwiebel- und Windrosendiagrammen sollte man absehen, da diese Diagrammtypen eher negative Emotionen auslösen können. Als Limitation dieser Studie sollte berücksichtigt werden, dass sich die Mehrheit der Proband*innen bisher weniger mit dem Thema Energie beschäftigt haben und Personen, die mehr Erfahrung in der Nutzung von HEMS oder anderen Energieplattformen haben, eventuell andere Präferenzen hinsichtlich der Diagrammtypen aufweisen. Diese Thematik könnte in weiteren Studien hinsichtlich Zielgruppensegmentierung analysiert werden. Dennoch liefert diese Studie umfassende Erkenntnisse, wie man Visualisierungen zum Stromverbrauch einer breiteren Masse niederschwellig zugänglich machen kann.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der FTI-Initiative „Vorzeigeregion Energie“ durchgeführt.

LITERATUR

- Bateman S., Mandryk R. L., Gutwin C., Genest A., McDine D. & Brooks C. (2010) Useful Junk? The Effects of Visual Embellishment on Comprehension and Memorability of Charts. Atlanta.
- Bojko A. (2013) Eye tracking the user experience: A practical guide to research. Rosenfeld Media.
- Fang Y. M., Chun L. & Chu B. C. (2019) Older adults' usability and emotional reactions toward text, diagram, image, and animation interfaces for displaying health information. *Applied Sciences*, 9(6), 1058.
- Fischer C. (2008) Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?. *Energy efficiency*, 1(1), 79-104.
- Goldberg J. & Helfman J. (2011) Eye tracking for visualization evaluation: Reading values on linear versus radial graphs. *Information Visualization*, 10(3), 182-195.
- Grant W. (2016) Energy Data Visualization Requires Additional Approaches to Continue to be Relevant in a World with Greater Low-Carbon Generation. *Frontiers in Energy Research*. 4, 33.
- iMotions (2017) Eye Tracking – The Complete Pocket Guide. iMotions.
- Herrmann M. R., Brumby D. P., Oreszczyk T. & Gilbert X. M. (2017) Does data visualization affect users' understanding of electricity consumption? *Building Research & Information*, 46(3), 238-250.
- Murugesan L. K., Hoda R. & Salciu Z. (2015) Design criteria for visualization of energy consumption: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society* 18, 1-12.
- Pentus K. & Ploom K. & Kuusik A. & Mehine T. (2018) How to optimize sales flyers – novel experiment design. *Baltic Journal of Management*. 13.

- Quispel A. & Maes A. (2014) Would you prefer pie or cupcakes? Preferences for data visualization designs of professionals and laypeople in graphic design. *Journal of Visual Languages and Computing* 25, 107-116.
- Rist T. & Masoodian M. (2019) Promoting sustainable energy consumption behavior through interactive data visualizations. *Multimodal Techn. and Interaction*, 3(3), 56.
- Schwartz T., Stevens G., Jakobi T., Deneff S., Ramirez L., Wulf V. & Randall D. (2015) What People Do with Consumption Feedback: A Long-Term Living Lab Study of a Home Energy Management System. *Interact. Comput.*, 27, 551-576

KONTAKTDATEN:

Thomas Kremsner, MA

Campus 1

7000 Eisenstadt

Email: thomas.kremsner@forschung-burgenland.at

Ungleich verteilte Chancen der Energiewende - Herausforderungen in der Energieforschung

F. Ettwein, A. Werner

Fachhochschule Technikum Wien, Österreich

ABSTRACT: Chance and burden of the energy transition are distributed unequally: low-income households lack of possibilities to actively participate and financially benefit within the energy transition; e.g. through funding of rooftop PV. Within the Clean Energy Package, the EU highlight the necessity to consider vulnerable households within member states' implementation of climate goals. Considering current new developments within the energy transition such as further decentralization of the energy system and the establishment of renewable energy communities provide new possibilities for participation of customers. To reach the goal of a just energy transition and sustainable integration of vulnerable households, research with those concerned is necessary in order to understand their motivations and limitations and offer suitable options for participation. At present state, the consideration of low-income households in research activities remain low, which prevents an all-inclusive and sustainable energy transition. The research project "Social Low Cost Flex" therefore aims to develop feasible low-cost solutions which enable residents of multi-party houses with special focus on social housing to profit and participate in the energy transition process. To that end, a survey with residents of eight social housing buildings in Vienna was conducted, aiming at identifying individual motives and challenges regarding renewable energy systems and community generation units including first aspects of distributive justice. The results show, that residents of social housing in Vienna have a generally positive attitude towards renewable energy and are interested in communal PV systems at their apartment building. This underlines the potential, which the social housing sector in Vienna provides for the achievement of Austrian climate targets. Within the research process, several challenges were faced. The identification of vulnerable households remains difficult, as there are various criteria, which can determine the situation of persons affected. Further, the accessibility of low-income households was demanding and required high amount of resources.

1. EINLEITUNG

Das Clean Energy Package der EU, welches u.a. starke Ausbauziele für erneuerbare Energieträger und Steigerung der Energieeffizienz umfasst, verpflichtet auch alle Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung dieser Ziele gleichzeitig Energiearmut zu bekämpfen und vulnerable Haushalte zu schützen. So ist in der Renewable Energy Directive (2018/2001) festgehalten, dass vulnerablen und einkommensschwachen Haushalten der Zugang zu erneuerbarer Energie ermöglicht werden muss.

Denn derzeit sind Chancen und Bürde in der Energiewende oft ungleich verteilt: Möglichkeiten, von der Energiewende zu profitieren bestehen etwa durch finanzielle Förderungen für die Investition in Erneuerbare Energieerzeugungsanlagen für Eigenheimbesitzer*innen, während für Personen in Mietwohnungen im urbanen Raum sowie für Personen mit geringerem Einkommen diese direkte Beteiligungsmöglichkeit kaum gegeben ist. Gegenwärtige Beteiligungsmöglichkeit als Haushalt besteht z.B. bei der freien Wahl des Energieanbieters, wobei erneuerbare Energien derzeit noch mit höheren Kosten verbunden sind, was einkommensschwache Menschen überproportional belasten kann (Brunner 2014).

Diese Ungleichheit ist auch Bestandteil verschiedener Forschungsprojekte im europäischen Raum, welche sich mit der Schaffung adäquater Angebote für vulnerable Gruppen im Bereich erneuerbare Energie befassen (z.B. Samson 2018). Bei diesen Initiativen handelt es sich jedoch um einzelne Projekte und die von der EU angestrebte Ziele einer umfassenden Integration vulnerabler Gruppen und

somit einer nachhaltigen und chancengerechten Energiewende sind noch unzureichend erfüllt (Saintier 2017; van Bommen & Höffken 2021). In Österreich bestehen Bemühungen in diesem Bereich z.B. im Rahmen energetischer Sanierungen, auch unter Einbezug erneuerbarer Energieträger (z.B. Mandl 2016, Berger & Hörtl 2019).

Mit dem Voranschreiten der Energiewende und dem Aufkommen von Energiegemeinschaften, welche eine weitere Dezentralisierung des Energiesystems bewirken, nimmt die Bedeutung einer chancengerechten Energiewende weiterhin zu. Die Schaffung von Energiegemeinschaften ist eine zentrale Maßnahme im Clean Energy Package, welche den Bürger*innen eine neue Art der Beteiligung ermöglicht, indem Strom gemeinsam erzeugt, verbraucht oder gespeichert wird. Diese neue Rolle der Bürger*innen im Energiesystem sowie die damit einhergehenden Chancen und Verantwortlichkeiten müssen noch im Rahmen der nationalen Gesetzgebungen ausgestaltet werden. Hier ist entscheidend, mögliche Ungleichheiten frühzeitig zu identifizieren und für die weiteren Umsetzungen von Energiegemeinschaften zu vermeiden, denn Ungleichheiten können z.B. durch Subventionen und Befreiungen (z.B. Befreiung von Abgaben für Mitglieder von Energiegemeinschaften) verstärkt werden. Hier besteht aktuell Forschungsbedarf, um faire und chancengerechte Gestaltung von Rahmenbedingung und Beteiligungsoptionen zu entwerfen.

Diese Problemstellung greift das Projekt Social Low Cost Flex (FFG Fördernr: 873524) auf, welches zum Ziel hat, geeignete Konzepte für die Integration erneuerbarer Energie im sozialen Wohnbau in Wien zu entwickeln. Dabei werden die sozioökonomischen, technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen des sozialen Wohnbaus berücksichtigt. Ein Schwerpunkt besteht darin, die Sicht der Betroffenen zu berücksichtigen und deren Herausforderungen für die Beteiligung an der Energiewende zu identifizieren. Der Fokus im Projekt liegt auf dem gemeinnützigen Wohnbau in Wien, welcher gute Rahmenbedingungen für die Entwicklung bietet: das Angebot des sozialen Wohnbaus in Wien richtet sich an verschiedene Gesellschaftsgruppen und bietet mit den sog. SMART-Wohnungen auch Angebote speziell für benachteiligte Gruppen. Daher besteht durch die heterogene Bewohner*innenstruktur die Möglichkeit, Personen mit verschiedenem gesellschaftlichen Hintergrund im Rahmen des Projekts einzubeziehen und deren Lebensrealitäten zu berücksichtigen.

Fokus dieses Beitrags liegt auf den Erkenntnissen aus der Beteiligung der Bewohner*innen. Um die betroffenen Personen in die Entwicklung neuer Beteiligungsmodelle miteinzubeziehen, wurden Befragungen in 7 Wohnhausanlagen in Wien zu den Themen Erneuerbare Energie, gemeinschaftliche Erzeugungsanlage sowie gerechter Stromverteilung durchgeführt. Die Ergebnisse ermöglichen die Entwicklung von Rahmenbedingungen und Modellen für die Gestaltung von Umsetzungsprojekten im Kontext des sozialen Wohnbaus. Zudem zeigen die Erkenntnisse aus dem Projekt und dem Beteiligungsprozess gegenwärtige Herausforderungen sowie weiteren Forschungsbedarf auf, deren Behandlung notwendig ist um die faire und chancengerechte Gestaltung der Beteiligungsoptionen für Energiekonsument*innen am zukünftigen Energiesystem zu ermöglichen und mögliche Benachteiligungen zu vermeiden.

2. METHODE

Im Forschungsprojekt erfolgte eine Zusammenarbeit mit drei gemeinnützigen Bauvereinigungen, um eine Einbeziehung von Bewohner*innen zu ermöglichen. Um die Zielgruppe der Bewohner*innen gemeinnütziger Wohnbauten in Wien genauer charakterisieren zu können sowie Informationen über deren Werte und Einstellungen gegenüber erneuerbaren Energien zu gewinnen, erfolgte im Dezember 2020 eine schriftliche Befragung von 285 Haushalten in sieben mit Wohnbauförderung errichteten Wohnhausanlagen (Befragungsrunde 1, Subsample 1). Um eine breite Beteiligung zu erreichen wurde eine postalische Befragung in Kooperation mit den jeweiligen Hausverwaltungen durchgeführt, wobei vielfältige Kanäle zur Beantwortung (kostenlose Rücksendung per Post, Einwurfboxen vor Ort sowie QR-Code und Link zur Online-Beantwortung) bereitgestellt wurden um eine möglichst einfache und an unterschiedliche Präferenzen angepasste Teilnahme zu ermöglichen. Der Fragebogen umfasse 25 vorwiegend geschlossene Fragen, mit nominal- oder ordinalskalierten Antwortmöglichkeiten. Die geschlossenen Fragen wurden in einigen Fällen um offene Fragen ergänzt, um weitere Kommentare zu ermöglichen.

Zur Vertiefung der gewonnenen Erkenntnisse aus Befragungsrunde 1 wurden Bewohner*innen einer geförderten Wohnanlage in Wien Simmering, auf deren Dach bereits eine PV-Anlage besteht und ein Mieterstrommodell in Umsetzung ist, im Rahmen persönlicher Türbesuche mittels eines standardisierten Fragebogens im Juni 2021 befragt (Befragungsrunde 2, Subsample 2). Die Wohnanlage umfasst 108 Mietwohnungen, davon 45 SMART-Wohnungen. Der bereits in Befragungsrunde 1 angewendete Fragebogen wurde um Fragen zur gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage ergänzt. Ziel dieser weiteren Fragen war es, die Zustimmung zu sozial ausgleichenden Verteilungsmechanismen zu erheben, was mittels Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) erfolgte.

Die Auswertung erfolgte mittels der Software IBM SPSS Statistics 26.0 sowie mittels XLSTAT 2021.1.3 zur Auswertung des AHP. Für einen Überblick über die Daten erfolgten Häufigkeitsanalysen. Für die Identifikation von Zusammenhängen und Abhängigkeiten wurden Kontingenzanalysen (χ^2 Test, $\alpha=0,05$) und Varianzanalysen ($\alpha=0,05$) durchgeführt.

3. ERGEBNISSE

Mit der Befragung konnten 115 Bewohner*innen gemeinnütziger Wohnbauten in Wien erreicht werden. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 29 %. Da sich die Fragebögen der beiden Befragungsrunden teils unterscheiden, sind Ergebnisse des gesamten Samples ($n=115$) bzw. der beiden Befragungsrunden (Subsample 1 von Dezember 2020, $n=82$; Subsample 2 von Juni 2021, $n=33$) getrennt ausgewiesen.

Bei der Stichprobe handelt es sich um Vertreter*innen aller Alters- (von 22 bis 86 Jahre, $\text{ø}46,7$ Jahre), Einkommens- und Bildungsschichten, der Anteil an Männern und Frauen ist in etwa gleich hoch. Das Sample spiegelt somit die soziale Durchmischung im gemeinnützigen Wohnbau in Wien gut wider. Zur Beurteilung der finanziellen Lage der Haushalte wurden die Variablen des Haushaltseinkommens, und der Anzahl der erwachsenen und minderjährigen Personen herangezogen.

Im Antwortverhalten zeigt sich insgesamt kein Unterschied zwischen ökonomisch schlechter oder besser gestellten Personen. Die ökonomische Lage weist keinen Zusammenhang mit Technikaffinität oder Umweltbewusstsein auf.

Wie nehmen die Befragten PV-Anlagen wahr?

PV-Anlagen finden bei den Befragten hohe Zustimmung, wie auch aktuelle Studien zeigen (z.B. Hampl et al. 2020).

Die Kenntnis, dass eine gemeinschaftliche Erzeugungsanlage im eigenen Wohnhaus in Wien Simmering vorhanden ist, war unter den Befragten in Subsample 2 ($n=33$) nicht durchgängig gegeben. So waren 6 der 33 Befragten nicht darüber informiert, dass sich eine PV-Anlage auf dem Dach befindet und 12 Personen wussten nicht über die Möglichkeit Bescheid, den Strom aus jener PV-Anlage zu beziehen. Auch in den persönlichen Gesprächen wurde von einigen Befragten auf den Informationsbedarf zum Mieterstrommodells hingewiesen. Interessanterweise geben jedoch auch Personen, welche nicht über das Mieterstrommodell informiert sind an, am Mieterstrommodell teilzunehmen. Die Teilnahme am Mieterstrommodell ist in erster Linie monetär motiviert, in zweiter Linie ist den Teilnehmer*innen wichtig, einen Beitrag zur Umwelt zu leisten. Bei diesen Ergebnissen ist kein Unterschied im Antwortverhalten feststellbar zwischen einkommensschwächeren und einkommensstärkeren Bewohner*innen.

Wie wollen die Befragten den gemeinschaftlichen PV-Strom verteilen?

Zur Feststellung ob ein ausgleichendes Verteilungsmodell Zustimmung im Wohnhaus finden würde, wurden in Befragungsrunde 2 verschiedene Optionen abgefragt, wie mit möglichem Überschussstrom umgegangen wird und wie die Verteilung des PV-Stroms innerhalb des Wohnhauses geschehen kann.

Bei der Frage, für welchen Zweck überschüssiger PV Strom aufgewendet werden soll, präferieren die meisten Befragten den Verkauf des Stroms zur Finanzierung weiterer PV Anlagen. Eine Spende oder der Verkauf an Nachbarn in angrenzenden Wohnhäusern, was in Form einer Energiegemeinschaft

durchgeführt werden könnte, wird insgesamt eher neutral bewertet. Auch wenn bei diesen Fragen keine signifikanten Unterschiede im Antwortverhalten vorliegen, ist dennoch ein Trend erkennbar: Wohlhabendere Personen stimmen allen vorgeschlagenen Verwendungen eher zu.

Die Bewohner*innen wurden auch befragt, welche Verteilung des PV Stroms der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage sie bevorzugen. Die möglichen Optionen waren eine Aufteilung des Stroms aliquot nach Einkommen, nach Verbrauch oder eine identische Menge an Strom für jeden Haushalt unabhängig von weiteren Kriterien. In Abb. 1 ist die Präferenz dieser drei Verteilungsmöglichkeiten dargestellt. Auf der y-Achse sind die Prioritäten, welche die Befragten der jeweiligen Option zuweisen, ersichtlich. Zur Unterscheidung der finanziellen Lage der Haushalte wird hier das Kriterium der SMART-Wohnungen herangezogen. Die Vergabe dieser besonders kostengünstigen Wohnungen beruht auf Kriterien, welche von der Stadt Wien vorgegeben sind, und bietet somit für eine mögliche Umsetzung – noch abgesehen von der rechtlichen Realisierbarkeit – eine klare Vorgabe.

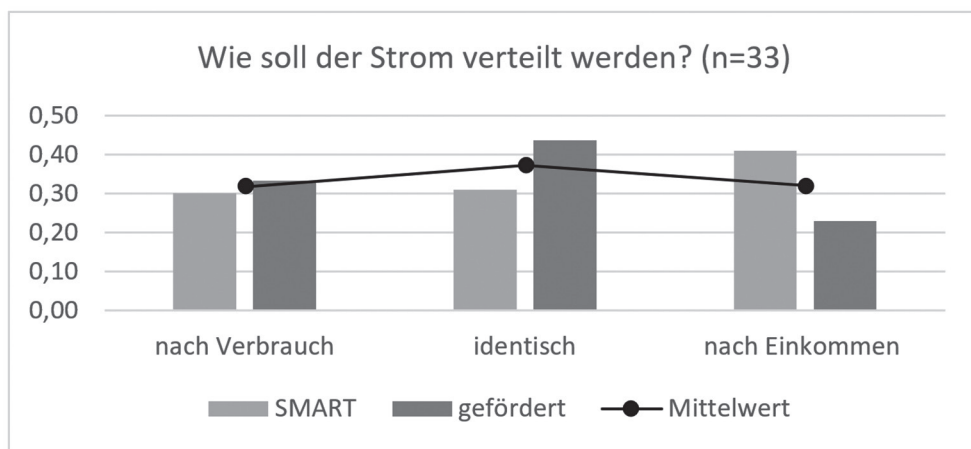


Abb. 1: Präferierte Möglichkeiten der Stromverteilung nach Art der Wohnung

Auch wenn kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Präferenz für eine bestimmte Option und der Art der Wohnung besteht, sind dennoch Unterschiede im Antwortverhalten zwischen geförderten und SMART-Wohnungen zu erkennen. So ordnen SMART-Wohnungen einer Verteilung des Stroms nach Einkommen eine höhere Gewichtung zu, als andere Haushalte. Eine Umverteilung des finanziellen Vorteils der PV-Stromnutzung von geförderten zu SMART-Wohnungen ist demnach nur schwer durchzusetzen, da diese Option für SMART-Wohnungen zwar an erster Stelle liegt, für andere Wohnungen jedoch die geringste Präferenz aufweist.

Betrachtet man die Ergebnisse als Mittelwert der beiden Gruppen, wird eine identische Verteilung des Stroms präferiert, was für die Befragung mit einer identischen finanziellen Einsparung gleichgestellt wurde. Diese Option ist somit vom statischen Modell der Stromverteilung in einer gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage zu unterscheiden, denn dort wird unter Umständen der fix zugeteilte Strom nicht gänzlich verbraucht, die absolute Einsparung einzelner Haushalte kann somit unterschiedlich ausfallen.

Sind die Befragten zu Investitionen in Erneuerbare bereit?

Hinsichtlich verschiedener Finanzierungsoptionen wurde in der ersten Befragungsrunde (Subsample 1, n=82) erfragt, ob sich die BewohnerInnen eine finanzielle Beteiligung an einer PV Anlage auf dem eigenen Wohnhaus vorstellen können. Die Mehrheit der Befragten (knapp 79 %) kann sich vorstellen, in eine PV Anlage auf dem Wohnhaus zu investieren (72,5 % „vielleicht“ und 6,3 % „sicher“). Jene

Personen, welche „sicher“ zu einer Investition bereit wären, würden von minimal 250 € bis maximal 10.000 € investieren. Das Investitionsinteresse hängt nicht von der finanziellen Lage der Haushalte ab, auch Personen mit geringem Einkommen können sich unter den genannten Bedingungen eine Investition vorstellen; Die höchsten Summen würden 1-2 Personen-Haushalte investieren. Betrachtet man die Ergebnisse pro Wohnhausanlage, würden für die jeweiligen Anlagen zwischen 3.700 € und 29.000 € an Investitionsvolumen erreicht werden.

4. DISKUSSION & SCHLUSSFOLGERUNG

In der vorliegenden Studie wurde versucht, benachteiligte Personengruppen zu erreichen und hinsichtlich erneuerbarer Energie und neuer Verteilungsmodelle für gemeinschaftliche Erzeugungsanlagen zu befragen.

Die Ergebnisse zeigen, dass ökonomisch benachteiligte Personen **vergleichbare Meinungen und Bedürfnisse** zum Thema der Energieversorgung und erneuerbarer Energie haben, wie wohlhabendere Personen. Allein aufgrund der finanziellen Situation darf somit kein Rückschluss auf Umweltbewusstsein oder Einstellung zur Energiewende getroffen werden. Zu diesem Ergebnis kommen auch andere Studien (MacCabe et al. 2018; Wolske 2020). Analog zu den Erkenntnissen der Literatur spielen für die Bewohner*innen gemeinnütziger Wohnbauten in Wien in erster Linie ökonomische Gründe bei der Betrachtung erneuerbarer Energiesysteme eine Rolle, an zweiter Stelle findet sich jedoch der Wunsch nach einer umweltfreundlichen Technologie.

Die **Frage der Verteilungsgerechtigkeit** wurde im Rahmen möglicher ausgleichender Verteilungsschlüssel für PV-Mieterstrom thematisiert. Betrachtet man das Fallbeispiel in Wien Simmering, bevorzugen die befragten Bewohner*innen eine Verteilung, welche einen identischen finanziellen Vorteil für alle Haushalte liefert, wobei hier unterschiedliche Meinungen zwischen Bewohner*innen von SMART-Wohnungen und geförderten Wohnungen bestehen. Gemessen am Haushaltseinkommen würden somit einkommensschwache Haushalte in geringem Maße stärker entlastet werden als einkommensstärkere.

Eine zentrale Limitation der durchgeführten Befragungen ist jedoch die **Definition der einkommensschwachen bzw. vulnerablen Gruppen**. Die tatsächliche persönliche Lage der Befragten lässt sich allein durch die erhobenen Variablen des Haushaltseinkommens, -größe und Beschäftigung der Haushaltsmitglieder nur unzureichend erfassen. Auch die Kriterien, welche der Vergabe von SMART-Wohnungen zugrunde liegen, und sich ebenso u.a. an Einkommen und Haushaltsgröße orientieren, gleichzeitig aber Faktoren wie z.B. Alter, Krankheit oder Familienstand (Alleinerzieher, Pensionist*innen,...) berücksichtigen, bieten zwar eine gute Ausgangslage zur Identifikation vulnerabler Gruppen, die tatsächliche Ausprägung der sozialen Benachteiligung (auch subjektiv von Seiten der Betroffenen) kann sich aber auch innerhalb dieser Gruppe stark unterscheiden. Ebenso liefern die Vorgaben des Clean Energy Package kaum Anhaltspunkte darauf, wie vulnerable Gruppen zu definieren sind. Dabei stellt nicht nur die Identifikation, sondern auch die **Erreichbarkeit** vulnerabler Gruppen eine Herausforderung dar. Selbst Forschungsprojekte, welche sich konkret auf das Thema Energiearmut spezialisieren, weisen auf die Schwierigkeit hin, ökonomisch schwächere Gruppen adäquat anzusprechen (Christanell et al. 2014; Brunner et al. 2011; Berger & Hörtl 2019), was hohen Zeit- und Ressourcenaufwand erfordert. Auch in gegenständlicher Befragung war der Ressourcenaufwand für die schriftlichen Aussendungen sowie die persönlichen Begehungen sehr hoch. So bleibt die Herausforderung der Identifikation und Definition sowie Ansprache vulnerabler Gruppen nicht nur im gegenständlichen Projekt, sondern auch für die weitere Forschung.

Eine weitere Herausforderung die sich im Forschungsverlauf gezeigt hat, ist es, die **Komplexität des Themas** einerseits der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage und damit verbundener möglicher Beteiligung an der Energiewende, andererseits der Verteilungsgerechtigkeit auf verständliche Art und für Bewohner*innen relevante Fragestellungen herunterzubrechen, insbesondere in Anbetracht der unklaren Rahmenbedingungen hinsichtlich organisatorischer und administrativer Prozesse auf Seiten der Befragten. Auch handelt es sich bei dem Thema der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen sowie auch bei Energiegemeinschaften um Fragestellungen, die in der alltäglichen bekannten Praxis der Strom-

nutzung bisher nicht gegeben sind und somit eine geringe Relevanz im Alltag der Bewohner*innen aufweisen. Der Anspruch der Energieforschung einer frühen Beteiligung von Bewohner*innen zur co-creativen Entwicklung von Lösungen, welche genau für jene auch akzeptabel und nutzstiftend sind, steht hier teilweise einer möglichen Überforderung der Betroffenen gegenüber, nämlich der Anforderung, sich Problemen zu widmen, die nicht dem realen Lebenskontext entspringen.

Der Beitrag zeigt die Herausforderungen, die bei der Gestaltung einer chancengerechten Energiewende bestehen, sowie die Herausforderungen jene, welche von den zukünftigen Entwicklungen stark betroffen sind, aktiv miteinzubeziehen. Für ein tiefgreifendes Verständnis der Situation vulnerabler Gruppen und deren Wahrnehmung des zukünftigen Energiesystems um ihre zukünftige Position gerecht zu gestalten ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

ACKNOWLEDGMENTS

Dieser Beitrag basiert auf Ergebnissen des geförderten Forschungsprojekts „Social Low Cost Flex - Gemeinschaftliche flexible Low-Cost-Energieversorgungskonzepte im sozialen Wohnbau“ (FFG Fördernr: 873524), gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie im Rahmen der 6. Ausschreibung des Programms Stadt der Zukunft.

LITERATUR

- Berger T. & Hörtl A. (2019) Thermal insulation of rental residential housing: Do energy poor households benefit? A case study in Krems, Austria. *Energy policy*, 127, 341–349.
- Brunner K. M. (2014) Nachhaltiger Konsum und soziale Ungleichheit. Wien: AK.
- Brunner K.-M., Spitzer M. & Christianell A. (2011) NELA-nachhaltiger Energieverbrauch und Lebensstile in armen und armutsgefährdeten Haushalten.
- Christianell A., Mandl S., Leitner M., Brunner K.-M., Jamek A., da Silva K. K.-S., Nwafor C. & Schmid G. (2014) Pilotprojekt gegen Energiearmut - Endbericht. Wien: ÖIN.
- HAMPL N., Hoffmann W., Sposato R., Marterbauer G., Nowshad A., Strebl M. & Salmhofer A. (2020) Erneuerbare-Energien-Studie.
- Mandl D. (2016) Smart City im Gemeindebau—Endbericht. Wien: Energieinstitut der Wirtschaft GmbH.
- McCabe A., Pojani D. & van Groenou A. B. (2018) The application of renewable energy to social housing: A systematic review. *Energy Policy*, 114, 549–557.
- Saintier S. (2017) Community Energy Companies in the UK: A Potential Model for Sustainable Development in “Local” Energy? *Sustainability*, 9(8), 1325.
- Samson H. (2018). Bringing local energy benefits to deprived communities. Bristol: Centre for sustainable energy.
- van Bommel N. & Höffken J. I. (2021) Energy justice within, between and beyond European community energy initiatives: A review. *Energy Research & Social Science*, 79, 102157.
- Wolske K. S. (2020) More alike than different: Profiles of high-income and low-income rooftop solar adopters in the United States. *Energy Research & Social Science*, 63, 101399.

KONTAKTDATEN:

Frederike Ettwein
 Fachhochschule Technikum Wien
 Kompetenzfeld Renewable Energy Systems
 Giefinggasse 6
 1210 Wien
 Email: frederike.ettwein@technikum-wien.at

Session 5a

Wärme- & Kältenetze

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung: Moderne Technologie allein ist kein Garant für hohe Effizienz

Moderau, Floss / Hochschule Biberach / DE

Application of High-Efficiency and Renewable Energy Sources in a DH System

Mudrá, Takács / Slovak University of Technology in Bratislava / SK

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung: Moderne Technologie allein ist kein Garant für hohe Effizienz

T. Moderau, A. G. Floss

Institut für Energie- und Gebäudesysteme, Hochschule Biberach, Deutschland

ABSTRACT: The article describes the importance of coordinating temperature levels in modern cooling and heat pump systems for energy-efficient operation.

The cooling and heating supply of a food logistics company in the Allgäu region serves as a practical example.

Over the past 15 years, the company has made large investments in a modern, innovative, and climate-friendly energy supply. They installed plus-cooling via a central brine circuit, cooled by propane refrigeration machines and an absorption refrigeration machines. For the deep freeze cooling, a CO₂ refrigeration machine is connected in cascade with the central brine circuit. Heating energy is provided by two sources: a compact CHP unit which provides high temperature level (max. 95 °C) and a condensing heat utilisation of the propane refrigeration machines at a temperature level of approx. 50 °C. The CHP unit should primarily be used to drive the absorption refrigeration machine, while the propane chillers only supply building heating at a lower temperature level (approx. 50 °C).

System investigation pointed out low efficiency of the cooling and heating supply. The reason can be seen in a poor coordination of the subsystems. By optimisation of the temperature levels, the COP of the propane refrigeration machine could be raised by about 20 %. The heat ratio of the absorption refrigerator could be raised from 0.15 to 0.6 by the factor of four. Due to hydraulic problems, the condensing heat is discharged via roof and not fed into the heating grid which leads to extreme energy losses. This condition could also be improved.

The optimisation success can be achieved by adjusting the mass flows in the cooling and heating networks and the setpoints of temperature specifications.

1. EINLEITUNG

Das Lebensmittel-Logistikunternehmen Früchte Jork im Allgäu hat in den Jahren 2009 bis 2011 große Investitionen in eine moderne und klimafreundliche Energieversorgung getätigt. Die alte, dezentrale Kälteerzeugung mit klimaschädlichen Kältemitteln (R12 und R22) für einen umfangreichen Bestand an Plus- und Tiefkühlhallen wurde durch ein zentrales System ersetzt. Dieses arbeitet mit den natürlichen Kältemitteln Propan und CO₂ und ist mit einer Kälte-Wärme-Kopplung ausgestattet. Im Jahr 2019 wurde das System mit einem BHKW und einer Absorptionskältemaschine um eine innovative Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung erweitert. Seit 2021 ist ein kommunales kaltes Nahwärmenetz mit dem Heizsystem des Unternehmens verbunden. Es ist angedacht, dieses mit Abwärme der Kältemaschinen zu versorgen. Allerdings kamen beim Betreiber schnell Befürchtungen bezüglich einer ungünstigen Komponentenabstimmung auf. Dies führte zur Systemuntersuchung durch das Institut für Energie- und Gebäudesysteme der Hochschule Biberach.

Die Untersuchung brachte mehrere Optimierungsansätze hervor, von denen einige in der Umsetzung sind und hier genannt werden. Dabei kann die Effizienz teilweise bis um den Faktor 4 verbessert werden. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere der Abstimmung von Temperaturniveaus im System eine sehr große Bedeutung zukommt.

2. SYSTEMBESCHREIBUNG BESTAND

Das Energiesystem lässt sich in eine Kälte- und in eine Wärmeversorgung unterteilen. Dabei bestehen mehrere Systemkopplungen.

2.1 KÄLTESYSTEM

Die Raumtemperaturen zur Lebensmittellagerung betragen in den Tiefkühlhallen $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, in den Pluskühlhallen (Molkereiprodukte, Warenannahme, Kommissionierung) zwischen $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Tiefkühlhallen werden über CO_2 -Direktverdampfung gekühlt, die Pluskühlhallen über zwei separate Solenetze. Als Kälteübertrager kommen in den Hallen ventilatorgestützte Umluftkühlgeräte zum Einsatz. Die Komponenten und deren Verschaltung im Kältesystems sind in Abb. 1 dargestellt und werden im Folgenden genauer beschrieben.

Das Solenetz A wird von zwei identischen Kompressionskältemaschinen (P-KM 1 und 2) mit einer Kälteleistung von jeweils ca. 200 kW gekühlt. Die Maschinen werden mit dem natürlichen und klimafreundlichen, aber brennbaren Kältemittel Propan (R290) betrieben. Die Kälteleistung wird auf eine Sole-Vorlauftemperatur von $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt. Als weiterer Kälteerzeuger ist eine Absorptionskältemaschine (AKM) verbaut, die von einem BHKW beheizt wird. Sie liefert eine Kälteleistung bis maximal 100 kW und koppelt die Kälte in den warmen Rücklauf des Solenetzes ein. Als Kältemittel dient der natürliche und klimaneutrale Stoff Ammoniak (R717).

Über das Solenetz A wird neben der Wärme aus den Pluskühlhallen auch die Verflüssigungswärme einer CO_2 -Kältemaschine (CO_2 -KM) abgeführt. Durch die Kaskadenschaltung arbeitet diese im unterkritischen Bereich. Sie hat eine Kälteleistung von ca. 50 kW und versorgt die Tiefkühlhallen über CO_2 -Direktverdampfung.

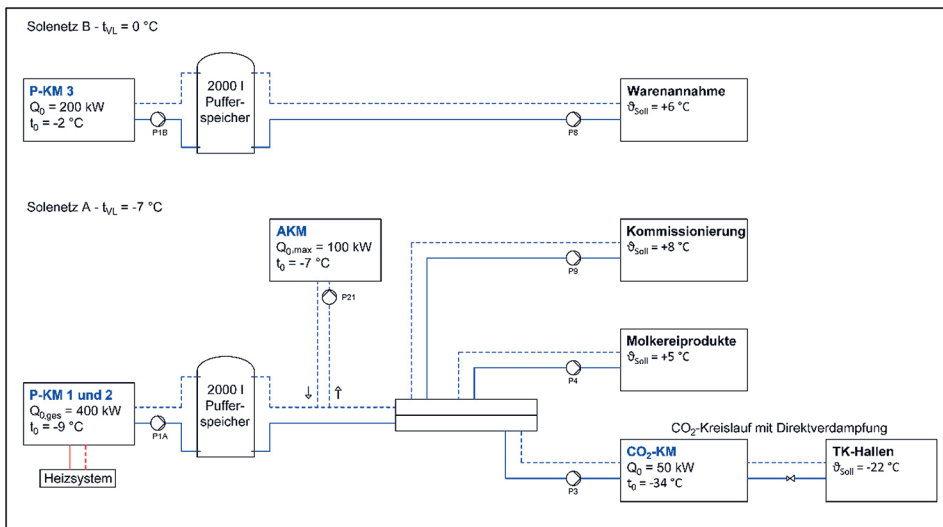


Abb. 1: Vereinfachtes Hydraulikschema des Kältesystems

Das Solenetz B wird von einer dritten, baugleichen Propan-Kältemaschine (P-KM 3) versorgt. Die eingestellte Vorlauftemperatur in diesem Netz beträgt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es versorgt die Pluskühlhalle zur Warenannahme ($+6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Beide Solenetze verfügen über einen 2.000 Liter Pufferspeicher als hydraulische Weiche. Die Volumenströme der Netze sind unregelt und damit konstant.

Die Abwärme der Kältemaschinen wird über Dachkondensatoren an die Umgebungsluft abgeführt. Die Anlagen P-KM1 und 2 können die Abwärme alternativ als Heizwärme in das zentrale Heizsystem auskoppeln.

2.2 HEIZSYSTEM

Alle Büros, Lager- und Werkstatthallen, Kühlhallen (zur Abtauung der Umluftkühler) und ein großes Wohngebäude für Angestellte sind an das zentrale Heizsystem angeschlossen. In Abb. 2 ist ein vereinfachtes Hydraulikschema dargestellt.

Dem Heizsystem stehen drei Wärmeerzeuger zur Verfügung. Das bereits erwähnte BHKW wird zur Eigenstromversorgung verwendet und ist somit stromgeführt. Bei einer elektrischen Leistung von 70 kW bis 140 kW ergibt sich eine Heizleistung zwischen 130 kW und 220 kW. Es erzeugt Wärme auf einem Hochtemperaturniveau mit bis zu 95 °C. Eine zweite Wärmeerzeugergruppe sind die genannten Kältemaschinen P-KM 1 und 2. Sie können durch ein Anheben der Verflüssigungstemperatur die Abwärme auf einem Niedertemperaturniveau (ca. 50 °C) an das Heizsystem auskoppeln. Im Winter steht somit je nach Kälteast eine Heizleistung zwischen 50 kW und 200 kW zur Verfügung. Überschüssige Wärme wird über Verflüssiger auf dem Dach abgefahren. Der dritte Erzeuger ist ein dezentral im Wohngebäude verbauter Brennwert-Gaskessel mit ca. 100 kW. Er kann keine Wärme in das zentrale Heiznetz einspeisen.

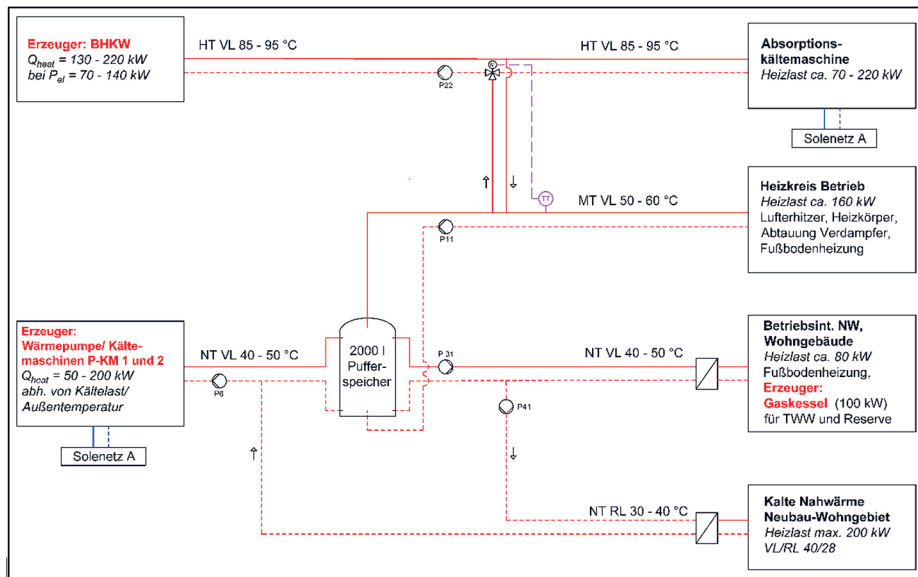


Abb. 2: Vereinfachtes Hydraulikschema des Heizsystems

Auf der Verbrauchsseite lassen sich vier Gruppen mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen einteilen. Die Hochtemperaturwärme des BHKW versorgt den Austreiber der Absorptionskältemaschine. Für eine hohe Effizienz sollte die Temperatur möglichst hoch, d.h. nahe 95 °C liegen. Die Abwärme der AKM von 20 °C bis 30 °C kann im System nicht mehr genutzt werden und wird über Dach abgefahren.

Auf Mitteltemperaturniveau (max. 60 °C) versorgt der Heizkreis „Betrieb“ die Büros, die Lager- und Werkstatthallen, sowie die Abtauung der Umluftkühlergeräte. Die in den Hallen verbauten Lufterhit-

zer benötigen die Heizwärme mit 60 °C und geben damit die Vorlauftemperatur dieses Heizkreises vor. Das Heizwasser wird über die Kältemaschinen vorerwärmt und anschließend durch die Beimischung von BHKW-Wärme weiter erwärmt.

Für ein betriebsinternes Nahwärmenetz ist ein Niedertemperaturniveau (40 °C bis 50 °C) ausreichend, um das Wohngebäude mit 80 kW Heizlast auf einem angrenzenden Grundstück zu versorgen. Die Trinkwarmwassererwärmung erfolgt aus Hygienegründen mit Hochtemperatur (> 60 °C) über den dezentralen Gaskessel. Dieser ist zudem aus Redundanzgründen zur Versorgung des Wohngebäudes verbaut.

Mitte 2021 wurde ein vierter Wärmeabnehmer installiert. Über den Rücklauf des betriebsinternen Nahwärmenetzes wird Wärme an ein kommunales kaltes Nahwärmenetz ausgekoppelt, wodurch der Rücklauf auf unter 30 °C ausgekühlt wird. Das kalte Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von ca. 40 °C versorgt ein externes Neubau-Wohngebiet, die projektierte Leistung liegt bei rund 200 kW.

3. BEWERTUNGSKRITERIEN

Die Effizienz der Kältemaschinen wird über Kennzahlen bewertet.

Die Leistungszahl der Kompressionskältemaschinen ϵ_{KM} gibt das Verhältnis aus der erzeugten Kälteleistung zur aufgewendeten elektrischen Leistung an. Sie kann auch über die Multiplikation des Carnot-Faktors mit dem Gütegrad des Kältekreislaufs berechnet werden (Breidenbach 2004). Der Carnot-Faktor beschreibt einen idealen Kreisprozess und hängt ausschließlich von der Verdampfungs- und der Verflüssigungstemperatur ab. Diese Temperaturniveaus sollen durch eine verbesserte Prozess- und Komponentenabstimmung optimiert werden. Der Gütegrad gibt die inneren Verluste und damit die Abweichung des realen vom idealen Kreisprozess an. Er wird in dieser Arbeit zwar berücksichtigt, bleibt aber unverändert, da die Optimierung der Maschinen nicht Teil des Projektumfangs ist. Üblicherweise werden bei der Berechnung der Leistungszahlen von Kältemaschinen alle Hilfskomponenten wie Ventilatoren und Regelungsorgane berücksichtigt. (Becker 2009)

Als Vereinfachung beziehen sich die Leistungszahlen hier allerdings nur auf den Aufwand der Verdichter. Auch die Effizienz von Kältemaschinen mit einer Kälte-Wärme-Kopplung wird in der Regel über die Leistungszahl beschrieben (Breidenbach 2004). Dabei wird die Summe aus Kälte- und Wärmeleistung als Nutzen betrachtet. Mit dieser Kennzahl ist jedoch keine Bewertung des Mehraufwands für die Nutzbarmachung von Abwärme als Heizwärme möglich. Deshalb wird eine Leistungszahl COP_{WP}^* eingeführt. Sie beschreibt nur den Mehraufwand $P_{el,WP}^*$ durch eine angehobene Verflüssigungstemperatur im Verhältnis zur gewonnenen Heizleistung \dot{Q}_{heat} (Gleichung 2). Die Leistungszahl für die Kälteerzeugung ϵ_{KM}^* bleibt gegenüber der reinen Kälteerzeugung unverändert (Gleichung 3). Der elektrische Mehraufwand ist im rechten Teil der Abb. 3 schematisch dargestellt.

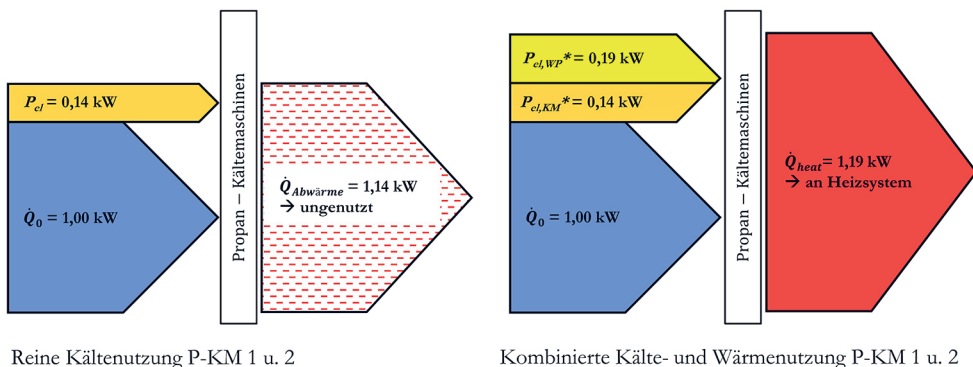


Abb. 3: Schematische Darstellung zur Berechnung von COP_{WP}^*

$$P_{el,ges}^* = P_{el,KM}^* + P_{el,WP}^* \quad (1)$$

$$COP_{WP}^* = \frac{\dot{Q}_{heat}}{P_{el,WP}^*} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{KM}^* = \varepsilon_{KM} = \frac{\dot{Q}_o}{P_{el,KM}^*} \quad (3)$$

Die Effizienz von Absorptionskältemaschinen wird als Wärmeverhältnis angegeben. Dieses gibt die gewonnene Kälteleistung zur benötigten Heizleistung im Austreiber an. Der elektrische Leistungsbedarf für die Hilfskomponenten wird nicht mitbilanziert. (Breidenbach 2004)

4. SYSTEMANALYSE UND OPTIMIERUNGSANSÄTZE

Die Systemanalyse hat eine Vielzahl an Optimierungspotentialen aufgedeckt, wovon die Wichtigsten vorrangig umgesetzt werden sollen. Dabei ergeben sich unterschiedliche Einsparungspotentiale für die Komponenten.

4.1 KOMPRESSIONSKÄLTEMASCHINEN

Die größten Energieverbraucher des Unternehmens sind die beiden Propan-Kältemaschinen im Solekreis A. Die Energieeffizienz der Kältemaschinen wird über die Leistungszahl bewertet. Wie beschrieben, muss für eine hohe Effizienz der Temperaturhub zwischen Verdampfung und Verflüssigung möglichst geringgehalten werden. Der Temperaturhub ist dabei mindestens so groß wie die Differenz zwischen der Außentemperatur und den Kühlhallentemperaturen. Hinzu kommt die sogenannte Grädigkeit in den Wärmetauschern des Systems. Die Grädigkeit gibt die Temperaturdifferenz zwischen den Übertragemedien auf der Primär- und der Sekundärseite des Wärmetauschers an. Sie wird zur Übertragung von thermischer Leistung benötigt. Im Kältesystem findet in drei Bereichen eine Wärmeübertragung statt: In den Verflüssigern, in den Verdampfern, sowie in den „Kälteverbrauchern“. Dies sind die Umluftkühlgeräte in den Hallen bzw. der Verflüssiger (Kaskadenübergabe) der CO₂-Kältemaschine.

In den Verflüssigern der Propan-Kältemaschinen herrscht je nach Kälteleistung eine Grädigkeit zwischen ca. 2 K und 10 K. Allerdings darf aufgrund des notwendigen Mindestdruckverhältnisses die Verflüssigungstemperatur nur auf maximal 15 °C abgesenkt werden. Bei niedrigen Außentemperaturen steigt daher die Grädigkeit an. In der Reduzierung der Grädigkeit im Verflüssiger steckt kein wesentliches Optimierungspotential.

Die Grädigkeit in den beiden Verdampfern liegt, ebenfalls abhängig von der Leistung, zwischen 1 und 4 K. Dies spricht für eine ausreichende Dimensionierung des Wärmetauschers, ein Optimierungspotential ist auch hier kaum vorhanden.

Die Pluskühlhallen, die an das Solenetz A angeschlossen sind, müssen lediglich auf +5 °C gekühlt werden. Bei einem Solevorlauf mit -7 °C herrscht eine Grädigkeit von 12 K. Im vergleichbaren Solenetz B ist diese Grädigkeit mit 6 K nur ca. halb so groß. Daher lag die Vermutung nahe, dass im Solenetz A Effizienzpotenziale stecken könnten.

Wie beschrieben wird auch der Verflüssiger der CO₂-Kältemaschine über den Solekreis A gekühlt. Aufzeichnungen zufolge hat in der Vergangenheit an dieser Maschine mehrfach ein Überdruck-Sicherheitsventil ausgelöst. Um dies zu verhindern, wurde die Sole-Vorlauftemperatur vom Personal abgesenkt.

Das Auslösen des Sicherheitsventils lässt sich allerdings nicht durch den zulässigen Höchstdruck der verbauten Komponenten erklären. Daher wurde der Einbau eines neuen, korrekt eingestellten Sicherheitsventils veranlasst. Durch diese Optimierung kann die Vorlauftemperatur des Solenetz A wie im Netz B auf 0 °C angehoben werden.

Bei einer unveränderten Grädigkeit von 2 K im Verdampfer steigt die Verdampfungstemperatur von -9 °C auf -2 °C . Bei einer Verflüssigungstemperatur von jeweils 30 °C verbessert sich damit das Leistungsverhältnis des Verdichters von 4,3 auf 5,3 – eine Steigerung um 23 %. (Bitzer-Software 2020) Bei der bisherigen elektrischen Gesamtverdichterleistung von 102 kW und geschätzten 2.500 Volllaststunden beträgt die Energieeinsparung ca. 48.000 kWh/a.

Allerdings hat die gestiegene Vorlauftemperatur eine Anhebung der Verflüssigungstemperatur der CO_2 -Kältemaschine von ca. -4 auf 3 °C zur Folge. Dies verschlechtert die Leistungszahl der Tiefkälte- Erzeugung zunächst deutlich von 3,6 auf 2,6 (-29 %) (Bitzer-Software 2020). Bei einer bisherigen Leistungsaufnahme der Verdichter von 14,4 kW und geschätzten 3.000 Volllaststunden entspricht dies einem Mehraufwand von 18.000 kWh/a.

Da jedoch auch bei der Tiefkälte eine große Temperaturdifferenz zwischen der Verdampfung und der Raumtemperatur festzustellen ist, besteht auch hier eine Möglichkeit zur Optimierung. Das eingestellte Verdampfungsniveau kann problemlos angehoben werden, ohne das geforderte Mindestdruckverhältnis im Verdichter zu unterschreiten. Begrenzend für die Auswahl der Verdampfungstemperatur ist jedoch die geforderte Überhitzung des Kältemittels und der Überhitzungsgrad der Verdampfer. Somit kann die Verdampfung von derzeit -34 lediglich auf -30 °C angehoben werden. Diese Optimierung lässt die Leistungszahl von 2,6 auf 3,1 ansteigen (+17 %), womit ca. 7.000 kWh/a eingespart werden können. (Bitzer-Software 2020)

In Summe reduziert sich durch die Anhebung der beiden Verdampfungstemperaturen der Energieaufwand um ca. 40.000 kWh/a, wodurch in etwa 8.000 € der jährlichen Stromkosten eingespart werden können.

4.2 WÄRMEPUMPENFUNKTION DER KÄLTEMASCHINEN

Die beiden Kältemaschinen P-KM 1 und 2 besitzen einen zweiten Verflüssiger, über den die Kondensationswärme als Heizenergie gewonnen werden kann. Bei dieser gekoppelten Kälte- und Wärmeerzeugung findet die Verflüssigung ausschließlich mit Heizungswasser statt. Dadurch steigt die Verflüssigungstemperatur gegenüber der Verflüssigung mit Außenluft bei der reinen Kältenutzung. Dies verschlechtert die Leistungszahl der Kälteerzeugung und erhöht den Verdichteraufwand. Dennoch kann der Einsatz dieser Wärmepumpenfunktion sinnvoll sein, um Heizenergie zu erzeugen.

Die Wärmepumpenfunktion wird mit dem in Kapitel 3 eingeführten COP_{WP}^* bewertet. Die Verflüssigungstemperatur liegt bei der reinen Kälteerzeugung je nach Witterung bei z.B. $+20\text{ °C}$, im Wärmepumpenbetrieb wird sie auf ca. $+50\text{ °C}$ angehoben. Die Verdampfungstemperatur beträgt in dieser Rechnung in beiden Fällen -2 °C . Die Leistungen für beide Betriebsweisen sind, bezogen auf 1,0 kW Kälteleistung, in Abb. 3 eingetragen.

Durch die angehobene Verflüssigungstemperatur sinkt die Leistungszahl des Verdichters für die reine Kälteerzeugung von 7,3 auf 3,1 (Bitzer-Software 2020). Die benötigte elektrische Leistung steigt damit von 0,14 kW auf 0,33 kW. Damit beträgt zwar der Mehraufwand $P_{\text{el,WP}}^*$ 0,19 kW, dafür werden aber 1,19 kW an Heizwärme gewonnen, was ein COP_{WP}^* von 6,3 ergibt. Mit dieser Leistungszahl wird die Effizienz üblicher Wärmepumpenanwendungen deutlich überschritten. Die Anhebung der Verflüssigungswärme auf ein nutzbares Heiztemperaturniveau ist somit aus energetischer Sicht sinnvoll, allerdings nicht aufwands- und damit kostenfrei. Bei den gegebenen Rahmenbedingungen betragen die Wärmekosten gut 3 ct/kWh.

Nach der ursprünglichen Planung sollen P-KM 1 und 2 das betriebsinterne Nahwärmenetz versorgen. Allerdings schneidet im aktuellen Betrieb die Hochtemperatureinspeisung des BHKW die Niedertemperatur der Wärmepumpenfunktion ab. Dies geschieht durch eine sehr hohe Rücklauftemperatur im Heizkreis „Betrieb“, womit der Pufferspeicher unbeabsichtigt von unten beheizt wird (vgl. Abb. 2). Ursächlich für die hohe Rücklauftemperatur ist zum einen eine deutlich zu hoch eingestellte Solltemperatur für den Vorlauf des Heizkreises „Betrieb“. Zum anderen findet an mehreren Stellen eine Überströmung des Vorlaufs in den Rücklauf statt.

Damit die Kältemaschinen zukünftig Wärme in das Heiznetz einspeisen können, müssen die Überströmungen im Heizkreis „Betrieb“ auf ein Minimum reduziert werden. Der Volumenstrom durch die Verbraucher wird über den nachträglichen Einbau von Regelventilen abhängig der Heizlast reduziert. Dadurch werden wesentlich niedrigere Rücklauftemperaturen erreicht.

4.3 ANHEBUNG DER BHKW-LEISTUNG

Momentan wird das BHKW konstant mit der halben elektrischen Nennleistung von 70 kW betrieben. Dieser Betriebspunkt wurde gewählt, um den Eigenstrombedarf nicht zu übersteigen. Eine ursprünglich geplante Kopplung mit dem öffentlichen Stromnetz konnte bislang nicht zu sinnvollen Konditionen realisiert werden.

Zwei Gegebenheiten schränken derzeit die sinnvolle Nutzung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ein: Bei hohen Außentemperaturen im Sommer erreicht die AKM aufgrund der hohen Rückkühltemperatur am Verflüssiger und Absorber nur ein sehr geringes Wärmeverhältnis. Daher wird der Verbund tagsüber im Sommer abgeschaltet. Bei niedrigen Außentemperaturen im Winter wird dagegen zu viel BHKW Wärme an den Heizkreis ausgekoppelt, es kommt zur Unterversorgung des Austreibers der AKM. In diesem Betriebszustand beginnt die Maschine zu Takten, wodurch das Wärmeverhältnis ebenfalls sehr gering wird.

Aus den Daten der RLM-Stromzähler ließ sich eine Lastganglinie der Verbraucher erstellen. Daraus geht hervor, dass die minimale Stromlast von ca. 70 kW nur kurzzeitig (ca. 2 Stunden im Jahr) anliegen. Daher macht es Sinn, das BHKW mit einer höheren elektrischen Leistung zu betreiben. Dadurch kann außerdem der elektrische Wirkungsgrad von derzeit 31 % auf bis zu 36 % gesteigert werden. (Sokratherm, s.a.) Eine dynamische Anpassung der elektrischen Leistung an den Verbrauch erfordert jedoch eine aufwändige Nachrüstung mit hohen Investitionskosten. Außerdem wird das System dadurch stör anfälliger. Daher soll das BHKW nicht mit der Maximalleistung, sondern konstant mit ca. 110 kW betrieben werden. So wird zwar ein geringer Teil der Strommenge unvergütet an das öffentliche Netz abgegeben (ca. 2 %), durch den deutlich höheren Eigenstromanteil und den besseren elektrischen Wirkungsgrad ist die Maßnahme dennoch wirtschaftlich. Es werden rund 250.000 kWh im Jahr mehr Strom erzeugt. Die jährliche Kosteneinsparung durch die Eigenstromerzeugung steigt um den Faktor 2 auf ca. 25.000 €.

4.4 STEIGERUNG DES WÄRMEVERHÄLTNISES DER ABSORPTIONSKÄLTEMASCHINE

Die Absorptionskältemaschine kommt derzeit im Mittel auf ein gemessenes Wärmeverhältnis von nur 0,15. Der projektierte Wert von 0,6 wird damit um den Faktor 4 unterschritten. Grund hierfür sind die ungünstigen und von der Projektierung abweichenden Temperaturen im Austreiber und im Verdampfer.

Während die Vorlauftemperatur des BHKW in der Projektierung bei 93 °C liegt, beträgt sie im realen Betrieb nur rund 85 °C. Die Abweichung entsteht durch den Teillastbetrieb des BHKW sowie durch die Abgabe von BHKW-Wärme an das Heiznetz.

Die Anhebung der BHKW-Leistung und die Reduzierung der Wärmeauskopplung wirken diesem Problem entgegen. Durch Nachrüsten einer Drehzahlregelung der Pumpe kann der Heizwasservolumenstrom durch das BHKW nach einer festen Vorlauftemperatur geregelt werden, was sich ebenfalls positiv auf die Austreibertemperatur auswirkt. Die jetzige, sehr niedrige Verdampfungstemperatur von ca. -7 °C ist auf die geringe Vorlauftemperatur, sowie eine sehr geringe Spreizung von zeitweise unter 2 K im Solenetz A zurückzuführen.

Eine deutlich höhere Rücklauftemperatur im Solenetz A und damit auch eine höhere Verdampfungstemperatur der AKM kann durch zwei Maßnahmen erreicht werden: Durch die bereits genannte Anhebung der Vorlauftemperatur, sowie durch den Einbau einer Volumenstromregelung der Sole. Diese kann eine feste Temperaturspreizung im Netz als Regelgröße haben.

Mit diesen Maßnahmen kann das Wärmeverhältnis der AKM den projektierten Wert erreichen und die Kraft-Wärme-Kältekopplung sinnvoll verwendet werden. Bei hohen Außentemperaturen über ca. 20 °C empfiehlt es sich dennoch weiterhin, den Verbund aus BHKW und AKM abzuschalten, da das Wärmeverhältnis ansonsten trotz der Optimierungsmaßnahmen sehr gering wird.

5. FAZIT, SCHLUSSBETRACHTUNG

Die Systemanalyse hat zahlreiche Optimierungspotentiale aufgedeckt, teilweise mit extremen Einsparpotentialen bis zum Faktor 4. Insbesondere konnte gezeigt werden, wie wichtig die Optimierung der Systemtemperaturen ist. Im untersuchten Energiesystem wird diese Verbesserung durch relativ einfache Maßnahmen wie der Justierung von Sollwerten und dem nachträglichen Einbau von Volumenstromregelungen in Kälte- und Heiznetzen erreicht. Die hier gewonnenen Erkenntnisse können auf alle modernen Energiesysteme mit gekoppelter Erzeugung von Kälte, Wärme und/oder Strom übertragen werden.

Da es in jeder realen Anlage immer wieder zu Veränderungen der Komponenteneinstellungen kommt, sind die getroffenen Optimierungsmaßnahmen jedoch kein Garant für eine dauerhaft hohe Effizienz: Ein fortlaufendes Monitoring mit Überwachung und Justierung der Temperaturniveaus ist daher ein wichtiger Schlüssel zu einer dauerhaft effizienten Energieumwandlung.

LITERATUR

- Becker M. (2009) Energetische Bewertung und optimierte Betriebsführung von Kälteanlagen. KI Kälte, Luft, Klimatechnik, 28-33
- Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH (2020), Bitzer Software 6.16.0.2522 [Software]
- Breidenbach K. (2004) Der Kälteanlagenbauer Band 2, Kälteanwendungen. Heidelberg; C.F. Müller Sokratherm (s.a.) Wirkungsgrade BHKW-Kompaktmodul GG 140, unveröffentlicht

KONTAKTDATEN:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floss
Hochschule Biberach
Karlstraße 11
88400 Biberach, Deutschland
Email: floss@hochschule-bc.de

Application of High-Efficiency and Renewable Energy Sources in a DH System

M. Mudrá, J. Takács

Department of Building Services, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia

ABSTRACT: One way to decarbonise the heat supply in buildings by using environmentally friendly and high-efficiency equipment and technologies that save primary energy is through existing district heating systems (DHS's) that supply several buildings at once. Many heat sources and equipment on the heat production and distribution side of these DHS's are beyond their service life or use fossil fuels as an energy source. It is therefore necessary to modernize such systems through high-efficiency sources and renewable energy sources (RES). As the Slovak Republic has a number of DHS's, we have proposed streamlining the existing heat source operation for the DHS of the West housing estate in the town of Brezno through a cogeneration unit (CU) and water-to-water heat pumps (HP's). We have assessed the proposal from the point of view of energy and economics.

1. INTRODUCTION

The existing hot water boiler plant is situated near the Hron River. The proximity of a watercourse creates preconditions for an excess of groundwater in the surrounding subsoil – a source of low-temperature energy. This energy will be transformed to a higher temperature level by water-to-water HP's (Mudrá 2019). The district boiler plant is a source of heating water and domestic hot water for 782 flats, ice arena, restaurant and a retirement home (Veolia 2019).

During heating season, there is uninterrupted 24-hour operation. In summer, the boiler plant is in operation from 4:00 am to 11:00 pm, i.e. 19 hours. The heat transfer medium is hot water with the original design temperature gradient of 90/70 °C. The heat source is represented by three hot water boilers with a total output of 6.67 MW. (Veolia 2019)

2. DESIGN MODEL FOR THE APPLICATION OF NEW DEVICES

2.1 OPERATION OF THE NEW HEAT SOURCE

A CU and HP's shall be installed instead of the existing heat source - hot water boilers. The energy source for driving the CU will be natural gas. The energy source for driving the HP's will be the electricity produced by the CU. The CU and HP's will be used to prepare hot water in an accumulative way. The storage tank will be located behind the CU and HP's and, at a time when the demand for hot water consumption is reduced, the heated hot water will accumulate in it. The accumulated heat will be supplied to the grid at the time of increased demand. The essence of the design is ensuring a continuous operation of the devices so that they work as long as possible and with a minimum of starts. (Mudrá 2019)

2.2 POWER OF THE COGENERATION UNIT AND HEAT PUMPS

To determine the optimal heat output of the devices, we need to know the domestic hot water consumption over 24 hours. The heat output of the devices can be determined based on the average hourly heat demand for domestic hot water preparation in June. Working days - Monday, Wednesday will be compared with a free day - Saturday. Fig. 1 shows that the domestic hot water is supplied between 4:00

am and 11:00 pm, i.e. 19 hours. On weekdays, the hot water consumption is highest in the morning and evening. On weekends, the hot water consumption is increased compared to working days and it is on average the same throughout the day. (Mudrá 2019)

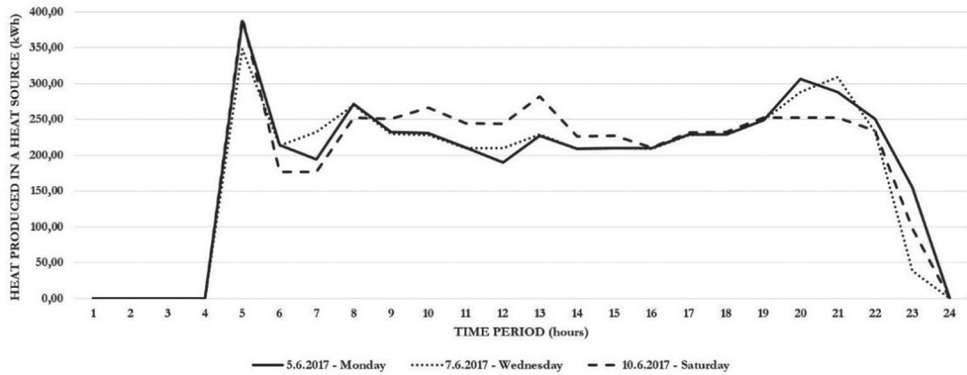


Fig. 1: Hourly heat demand for domestic hot water preparation over 24 hours.

The average hourly heat demand for domestic hot water preparation in 2016 was 275 kW, in 2017 it was 280 kW, and in 2018 it was 267 kW. By comparing the data for the period 2016 - 2018, the heat output of the CU and two HP's was set to 270 kW.

The CU and HP's will be located in front of the boilers in the direction of the return heating water flow. Fig. 2 shows the schematic diagram of the CU and HP's in the DHS. The heat transfer medium - heating water has a temperature of 45 °C. The aim is to produce a heat-transfer working substance - heating water with a temperature of 60 °C. The volume flow at a heat output of 270 kW and a temperature difference of 15 K is 15.48 m³/h (Mudrá 2019).

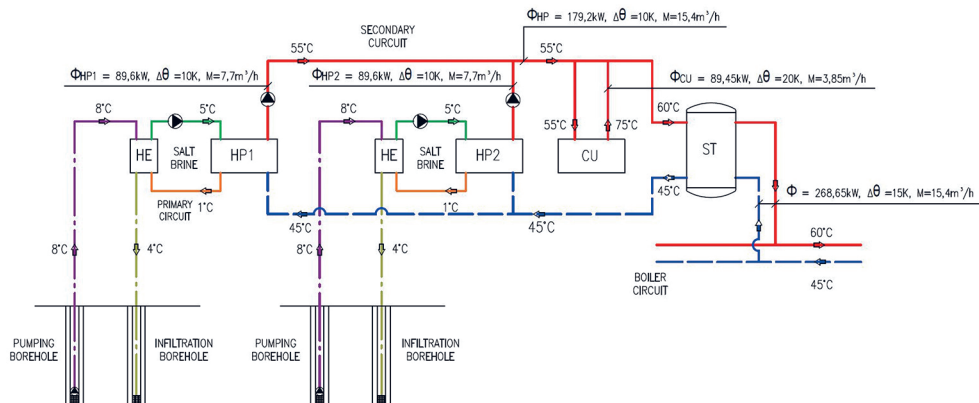


Fig. 2: Schematic diagram of CU and HP's. (HE – heat exchanger; HP – heat pump, CU – cogeneration unit, ST – storage tank)

The HP's operate with a primary gradient of 5/1 °C - this means that a low-temperature heat source enters the HP's (groundwater from wells) and is transformed in the HP's to a higher temperature, trans-

ferred to the secondary heating system circuit. Return heating water with a temperature of 45 °C enters the heat pump and is heated up by 10 K, which means that the water temperature at the outlet of the HP will be 55 °C. The output of both HP's was calculated to be 180 kW. The CU works with a temperature gradient ($\Delta\theta$) of 20 K as standard. This means that if water with a temperature of 55 °C enters the CU, the CU will heat the water to 75 °C at the outlet of the CU. The volume flow through the CU to reach 60 °C at the outlet of the unit and before entering the hot water storage tank is 3.87 m³/h. (Mudrá 2019)

For better controllability of the system, two identical two-stage water-water HP's are proposed, while the heat output of one was set at 89.6 kW. For the CU together with the HP's to create a set, it is necessary to harmonize their thermal outputs and also electrical inputs, as the CU will supply electricity to the HP's. The interaction between the HP's and the CU was simulated using calculation programs in cooperation with the supplier of these devices. The heat output of the CU was set at 90 kW. (Mudrá 2019)

3. RESULTS – ENERGY ASPECTS

3.1 NATURAL GAS CONSUMPTION

HP's and CU were designed based on the operation and average energy consumption in 2016 - 2018. The average natural gas consumption was 598,740 m³/year and the average heat produced by the heat source was 6,066,354 kWh/year for 2016 – 2018. (Veolia 2019)

To estimate the future consumption of natural gas, we have to determine the number of operating hours of the individual devices and their output in winter, transition, and summer season (Mudrá 2019). The number of days in individual periods, the number of operating hours during the day, and the expected hourly outputs of the devices are given in Tab. 1.

Tab. 1: Expected use of the cogeneration unit and heat pumps throughout the year

Season	Months	Days	Operating hours	Operating hours in the season (h)	Hourly power of CU+HP's (kW)	Produced thermal energy reduced by 5 % (kWh)
Winter	7	212	24	5,088	300	1,450,080
Transition	2	61	24	1,464	270	375,516
Summer	3	92	19	1,748	255	423,453
Σ CU+HP	12	365	-	8,300	-	2,249,049

The expected total thermal energy produced by the CU and HP's throughout the year is 2,249,049 kWh = 2,249 MWh. The thermal energy produced by boilers is 3,817,305 MWh (Mudrá 2019).

A very important data is the consumption of natural gas by the CU. The consumption of natural gas for the CU in individual periods and throughout the year is shown in Tab. 2.

Tab. 2: Natural gas consumed by the cogeneration unit

Season	Hourly natural gas consumption by CU (nm ³ /h)	Operating hours in the season (h)	Final consumption of natural gas by the CU reduced by 5 % (m ³)
Winter	24	5,088	116,006
Transition	24	1,464	33,379
Summer	24	1,748	39,854
Σ	-	8,300	189,240

The total natural gas consumption by the CU throughout the year is 189,240 m³ (Mudrá 2019).

The value of the total heat in natural gas is obtained as the product of the total consumption of natural gas by the CU and the average calorific value of the fuel (9.701 kWh/m³), which is 1,835,817 kWh. These findings show that 1,835,817 kWh of energy consumed in natural gas is needed to produce 2,249,049 kWh of heat energy per year by the CU and HP's. To determine the total consumption of natural gas at a heat source, we need to know the consumption of natural gas by gas boilers. The consumption of natural gas by boilers was calculated to 401,527 m³. It follows from the above that the estimated total consumption of natural gas at the heat source is 590,767 m³. If we look at the average natural gas consumption before the installation of the CU, which is 598,740 m³/year and the expected natural gas consumption after the installation of the CU, which is 590,767 m³/year, it is seen that applying a CU and HP's should save 7,973 m³ of natural gas as compared to the existing operation of gas boilers (Mudrá 2019). At the time when the application was being addressed, the purchase price of natural gas per 1 kWh was 0.04234 euros (Veolia 2019). If we multiply the saved amount of natural gas by the average value of combustion heat (10.754 kWh/m³) and then multiply by the purchase price of natural gas, we find that the annual savings on natural gas is 3,631 euros (Mudrá 2019).

3.2 ELECTRICITY CONSUMED

A CU is a device for the combined production of heat and electricity (Pastor et al. 2000). A part of the generated electricity is used for its consumption, the predominant part is used to drive the HP's. It will also power submersible pumps in pumping wells and circulating pumps on the primary and secondary side (Mudrá 2019).

Given that we produce electricity by high-efficiency cogeneration, we can claim a surcharge following the Decree of the Office for Regulation of Network Industries no. 18/2017 Coll. laying down price regulation in the electricity sector. The surcharge for electricity is 34.55 euros/MWh (Decree no. 18/2017).

To find the prices of revenues for high-efficiency cogeneration, we have to determine how much electricity is produced by the CU each month and throughout the year. The data are shown in Tab. 3.

Tab. 3: Amount of electricity produced by the cogeneration unit

Season	Months	Days	Operating hours	Operating hours in the season (h)	Hourly electricity production (kW _e)	Electricity produced reduced by 5 % (kWh)
Winter	7	212	24	5,088	73	352,853
Transition	2	61	24	1,464	73	101,528
Summer	3	92	19	1,748	68	112,921
Σ CU+HP	12	365	-	8,300	-	567,302

The electricity produced during the annual operation of the facility will be 567,302 kWh per year, which represents 567.302 MWh per year. This value is again reduced by 5 % due to a fault or maintenance on the devices (Mudrá 2019).

As we know the surcharge for electricity and the amount of electricity produced, we can use the product of these items to find out what the revenues for high-efficiency cogeneration will be. Annual revenues for high-efficiency cogeneration amount to 19,600 euros (Mudrá 2019).

4. RESULTS – ECONOMIC ASPECTS

4.1 INVESTMENT COSTS

If we want to find out the return on streamlining the operation of the heat source through the CU and HP's, we must first know what the investment costs. As the manufacturer of the CU also deals with the installation and implementation of these devices, he provided an indicative price offer. The total investment costs for the implementation of the work amount to 502,820 euros (Mudrá 2019).

4.2 COGENERATION UNIT AND HEAT PUMPS MAINTENANCE COSTS

The maintenance costs of CU include spare parts, lubricating oil, coolant, work of a service technician and its transport within Slovakia. The annual maintenance costs of the CU amounts to 12,143 euros (Mudrá 2019).

The maintenance costs of HP's include refrigerant inspection, the work of a service technician and its transport from Bratislava to Brezno and back. The annual maintenance costs for both HP's are 1,206 euros (Mudrá 2019).

4.3 PROFITABILITY BASED ON CASH FLOW

Since the streamlining of the operation of the heat source is solved in the boiler plant, which is managed by the energy company, we can claim a legitimate claim from depreciation in the price of heat. We have to divide the individual equipment and works into depreciation groups and write off the relevant amount each year. This written-off amount represents cash income through the price of heat (quasi-profit item without the need for taxation). Subsequently, in the individual years, we apply the saved finances on natural gas. During these years, we also have to think about the maintenance of the CU and HP's, which represent negative items. With the sum of profit and loss items in individual years, we work towards the overall benefit from the operation of the facility. The results are visualized in the form of accumulated cash flow as shown in Fig. 3.

Fig. 3 shows that the revenue from depreciation, financial savings on natural gas and revenues for high-efficiency cogeneration will return the investment in 6 years from the installation of the devices (Mudrá 2019).

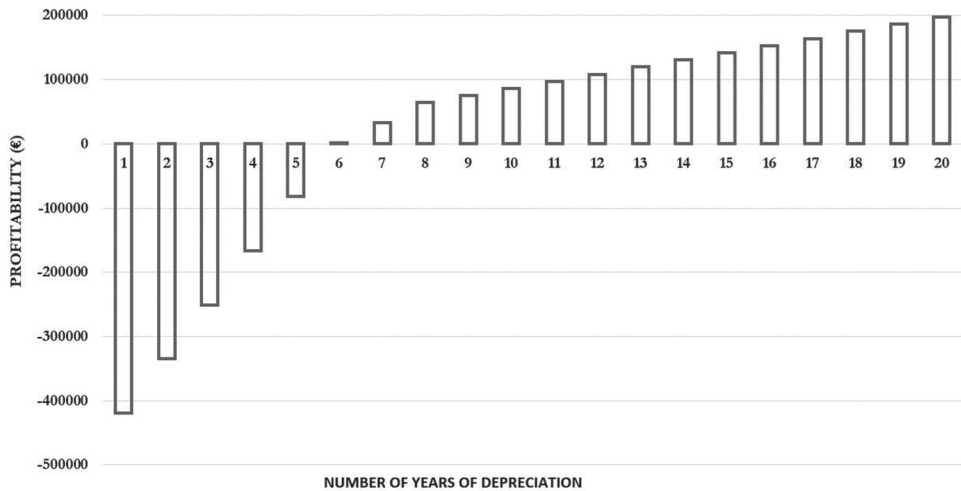


Fig. 3: Cumulated cash flow.

5. CONCLUSION

The reason to apply the CU and HP's in the given operation was the fact that DHS's have the potential for high-efficiency combined heat and power generation and efficient use of environmental energy through HP's.

The CU and HP's would be used to produce the heat needed to prepare hot water by storage, especially in summer. During the heating season, the additional heat produced will not accumulate, but will be supplied to the heating network.

The application of a CU and HP's to the existing operation of hot water gas boilers saves fossil fuel - natural gas, the reserves of which are gradually running out. The energy of the environment - groundwater - is used instead. From an energy point of view, the same or more heat energy is produced but less fuel is consumed. As far as the economy is concerned, saving fuel also saves money that would otherwise be spent on buying it. We also evaluate positively the annual sales for combined heat and power generation.

This research was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sport grants VEGA 1/0303/21, VEGA 1/0304/21 and KEGA 005/STU-4/2021.

REFERENCES

- Decree of the Office for Regulation of Network Industries no. 18/2017 Coll. establishing price regulation in the electricity sector. From: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2017/18/20180720.html> (on line).
- Mudrá M. (2019) Streamlining the operation of heat source TP5 for the housing estate Západ in Brezno [diploma thesis]. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services, 2019. 106 p.
- PASTOR P., HORÁK M., HORNÍK Š. (2000) Efficient use of energy in the operation of equipment and buildings. Bratislava: Jaga group. ISBN 80-88905-33-8. 159 p.

PETRÁŠ D., LULKOVIČOVÁ O., TAKÁCS J., FÜRI B. (2009) Renewable energy sources for low temperature systems. Bratislava: Jaga Group. ISBN 978-80- 8076-075-5. 223 p.

Veolia (2019) Energia Brezno a.s. From: <https://vesr.sk/sk/veolia-energia-brezno> (on line)

CONTACT:

Martina Mudrá

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Email: martina.mudra@stuba.sk

Session 6a

H2 – Green Energy Source of the Future for Austria and Slovenia?

Innovative pathways to low-carbon society

Likozar / National Institute of Chemistry / SL

Inspiring and preparing the next generation for green energy – an educational concept

Warmuth / Fachhochschule Kärnten / AT

R&D on lifetime of hydrogen fuel cells

Bodner, Heidinger, Roschger, Wolf, Malli, Hacker / TU Graz / AT

Integrated Hydrogen Energy Systems

Heschl / FH Burgenland GmbH / AT

Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT

Innovative pathways to low-carbon society

B. Likozar

National Institute of Chemistry, Ljubljana Slovenia

ABSTRACT: Social consensus in addressing the challenge of energy supply, its storage and energy independence in the wider European context is of great importance for a sustainable and circular future. Hydrogen is seen by most countries in the European Union as part of the solution to the decarbonisation of transport and industrial processes, particularly in the areas of energy storage, supply and increased use of energy from renewable sources. The main challenges we are currently facing are not only in the field of research, but also at the policy level, in the integration of technologies into the economy and industrial processes, and in the field of logistics. These challenges are universal and go beyond the national framework. It is therefore important that key stakeholders seek solutions at an interregional level. The H₂GreenTECH project aims to strengthen cross-border research and innovation capacities in advanced hydrogen technologies by developing synergies between enterprises, R&D centers, higher education and public entities in Slovenia and Austria.

Innovative pathways to a low-carbon society include not only hydrogen (H₂) technologies, but also carbon dioxide (CO₂) technologies and battery systems.

1. HYDROGEN TECHNOLOGIES

Green H₂ technologies are gaining momentum, but it will take several years before they can be commercialized and deployed in most critical sectors, mainly because the prices of key components - catalysts and electrical membranes - for hydrogen fuel cells are still too high, even though the technologies are already well developed. Therefore, one of the intermediate paths to H₂ technologies is blue hydrogen produced by converting methane. Methane is a hydrocarbon that is produced not only as a fossil resource, as the main component of natural gas, coal-bed gas and shale gas, but also from a variety of renewable sources such as biogas. Natural gas is flared in remote locations because it is too expensive to extract, and the greenhouse gas CO₂ is subsequently released into the atmosphere. The process, with appropriate looping has a low environmental footprint and can be an economical and sustainable alternative to petroleum. Moreover, methane is one of the most harmful greenhouse gasses, so its presence in the atmosphere affects the temperature and climate system of the Earth. Therefore, the conversion of methane into liquid fuels or building block chemicals has attracted renewed interest in recent years, especially beyond established technologies such as steam reforming, which is becoming less competitive.

Another interesting source of hydrogen is the valorization of carbon monoxide (CO). CO is an energy-rich molecule that escapes into the atmosphere and is a major pollutant. Through a process of (reverse) water gas shift, a clean hydrogen can be produced from CO. Syngas or synthetic gas is a fuel gas mixture of hydrogen and carbon monoxide and is an important intermediate for the production of hydrogen, ammonia, methanol, ethanol and synthetic hydrocarbon fuels. Further ammonia is one of the most notable H₂ storage, which is gaining on importance in the field of alternative energy and fuels resources. The Oracle project will develop scalable alternative reaction technology for decentralized production of ammonia as a renewable fuel from N₂ and H₂O.

2. CARBON DIOXIDE TECHNOLOGIES

CO₂ technologies are key technologies to fix upstream technologies or to use hydrogen downstream for decarbonisation in future industrial development. One of the interesting technologies in the energy sector is the synthesis of methanol from captured CO₂ using surplus electricity. The overall concept is to use the normally emitted greenhouse gas CO₂ and H₂ produced from surplus electrical energy to produce a widely usable platform chemical, methanol. The technology of methanol synthesis is designed in an intermediate modular scale to adapt to different plant sizes and gas compositions.

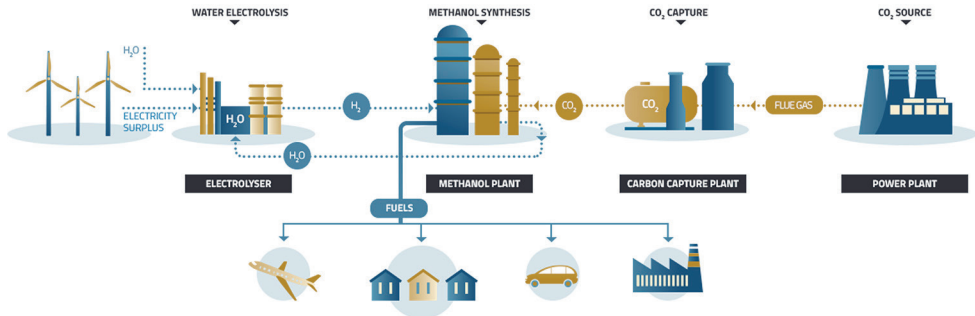


Abb. 1: MefCO₂ Project

In the steel, cement and refinery industries, there are some parts of processes that will be difficult to decarbonize even in the long term. One of the possible technologies in the steel industry is CO₂ capture and improving the technology to produce methanol fuel, which is used as fuel for ship transportation.

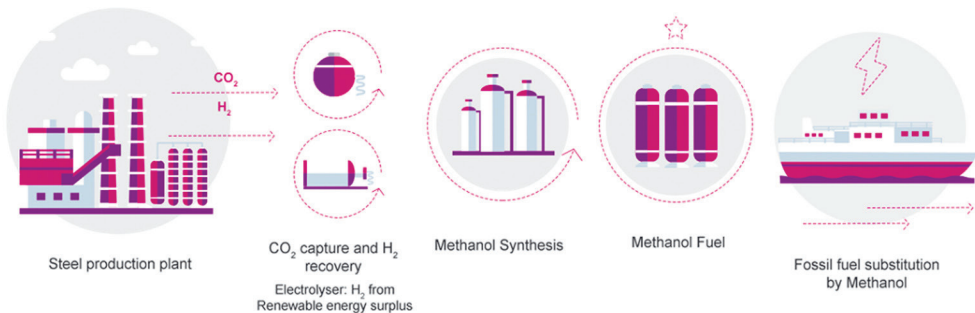


Abb. 2: FReSMe Project

Decarbonisation of energy-intensive industries is a cross-sectoral process that needs to be developed at all levels - not only in R&D, but also as a social contract that commits industries to decarbonisation at national/regional or European level. A price on carbon and hydrogen will determine whether the technology and decarbonisation approach is competitive or not. In general, the large gap between basic research and industrial needs for decarbonisation and hydrogen integration needs to be overcome. The most appropriate approach would be open innovation test beds. In terms of hydrogen, there is no "one size fits all". Therefore, demos, tests and pilots are needed, as each sector or country has a different potential to reduce GHG emissions.

CONTACT:

Blaž Likozar

Hajdrihova 19

1000 Ljubljana, Slovenia

Email: blaz.likozar@ki.si

Inspiring and preparing the next generation for green energy – an educational concept

A. Warmuth

Fachhochschule Kärnten, Kärnten, Österreich

1. INTRODUCTION

The future for H₂ technologies is to spread expert knowledge. The more people in the general community are aware of how important green energy technology is, the brighter the future of H₂ technologies. Therefore, with the help of the H₂ Greentech research group, Fachhochschule Kärnten will offer a course in the field of H₂ technology. The course will consist of theory sessions that will deal with basic knowledge of fuel cells right up to safety problems. Moreover, there will be laboratory sessions that will show the real-world application of fuel cells. The lab sessions will implicate basic measurements right up to applying system and control theory on different real-world fuel cell demonstrator models.

2. FUNDAMENTAL STRUCTURE OF THE COURSE

2.1 THEORY LECTURES

The course will consist of five theory sessions (Fig.1). It will impart basic knowledge from chemical fundamentals to commercial use, safety problems, and control operations with fuel cells. Therefore, the course is at a beginner's level for H₂ technologies.

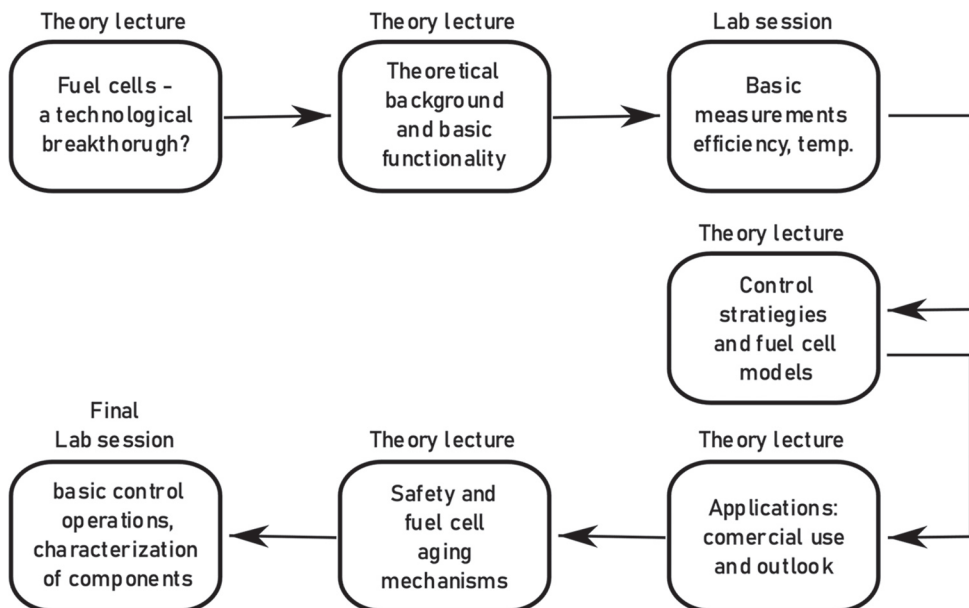


Fig. 1: Flowchart of the teaching concept

Moreover, the sessions will be onsite and take place at CUAS. The participants should have fundamental knowledge in engineering. Therefore, the primary audience will be students with an engineering background. Furthermore, the course is open to employees of companies who want to increase their knowledge in H_2 technologies. The course will be designed for approximately 15 participants.

2.2 LABORATORY SESSIONS

These theoretical sessions respectively prepare for an upcoming laboratory session (Fig.1). Within a lab session, the students could elaborate on real-world fuel cell demonstrator models. However, the laboratory session is a possibility for the participants to work with real-life fuel cell stacks used in commercial applications. In the first laboratory session, the participants will get a basic idea, what is necessary to operate with such a fuel cell stack. Moreover, measurements will be taken to characterize parameters like efficiency, temperature behavior, working point, etc. The second laboratory session will include the fuel cell automotive trainer (Fig.2). This trainer will show how to deal with a fuel cell stack in basic control operations. The experiment prepares the students to integrate fuel cells into real-world applications.

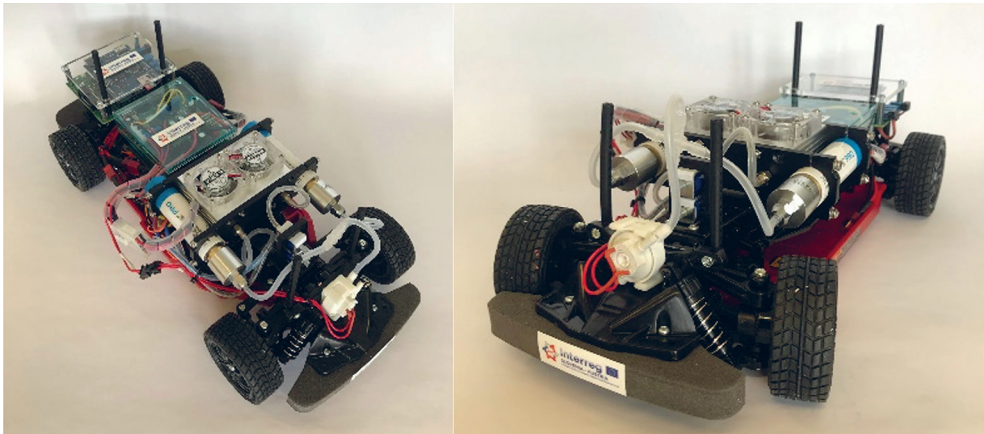


Fig. 2: Automotive trainer for educational laboratory

CONTACT:

Andreas WARMUTH

Europastraße 4

9524 Villach

Email: a.warmuth@fh-kaernten.at

R&D on lifetime of hydrogen fuel cells

M. Bodner, M. Heidinger, M. Roschger, S. Wolf, K. Malli & V. Hacker

Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology, Graz University of Technology, In-feldgasse 25C, Graz, Austria

1. INTRODUCTION

The reduction of greenhouse gas emissions and the emerging political focus on hydrogen as a clean energy carrier are accelerating research into sustainable hydrogen production and use. Fuel cells (FCs) are a promising technology for sustainable energy production as they run on environmentally friendly fuels such as renewable green hydrogen (European Union 2021). They are defined as electrochemical cells in which the chemical energy of a supplied fuel (gas or liquid) is directly converted into electricity (Hacker & Mitsushima 2018). Efficiency, lifetime and sustainability of the entire process chain play an important role.

For use as power supply in electric vehicles, polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) are seen as a viable option. The combination of long ranges and fast charging makes this technology particularly attractive. As part of the roll out of PEFC technology, the understanding, prediction and prevention of FC durability limiting issues is critical (Kocher et al. 2021). A reduction of lifetime is often caused by the degradation of key components in the heart of the fuel cell (Bodner et al. 2018). The membrane electrode assembly (MEA) consists of anode, cathode and polymer electrolyte membrane (Fig. 1).

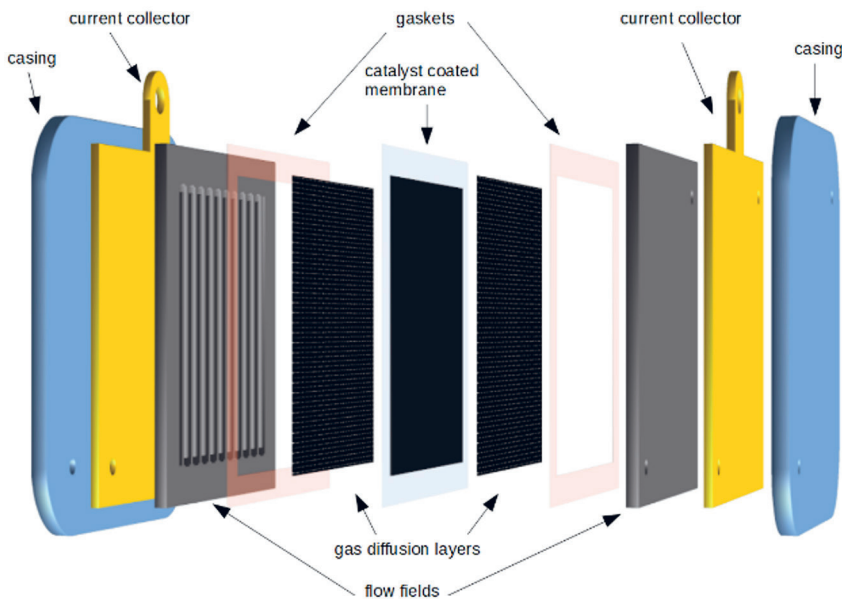


Fig. 1: Exploded view of a PEFC single cell (Ladreiter 2020).

Aging in PEFCs is a complex process, dependent on nearly all system factors and is therefore complex to simulate or extrapolate. However, the commercial application of fuel cells dictates the requirement of lifetime predictions. Therefore, multiple approaches can be used, the most common of which are accelerated stress tests (ASTs).

The performance and lifetime of a PEFC are dependent on several factors. When an abnormal or undesired condition occurs, the system performance usually degrades, system stability is impacted and the lifetime decreases. The duration and frequency of occurrence of these abnormal conditions has a great influence on the impact and severity. To determine the effect of specific conditions, they can be replicated in test procedures with their impact on individual fuel cell parameter being monitored. This gives a close-to-application insight into real life degradation mechanisms.

2. METHODS AND EVALUATION

ACCELERATED STRESS TESTS

In order to determine stability and durability of a system or system component, specific testing procedures are applied. Depending on the aim, ASTs can be designed for different purposes, applications and use case profiles.

One commonly utilised vulnerability of fuel cells is that towards start up and shut down conditions. For such tests, harmonised cycle profiles and test conditions are available from the U.S. DoE (The US Department of Energy (DOE), 2013) or the European Joint Research Centre (JRC) (Tsotridis et al. 2015). The start up is particularly critical. A representation can be found below. In Fig. 2, the test cell is flushed with nitrogen during the heating-up phase to the operating temperature of 80 °C. The cathode is supplied with air. After the operating temperature is reached, hydrogen is introduced in the anode, which immediately leads to a voltage peak and the electric current increases. The ageing process during the start-up procedure can be repeated as often as desired with the aid of a simulated load protocol and the effects of different operating parameters can thus be determined.

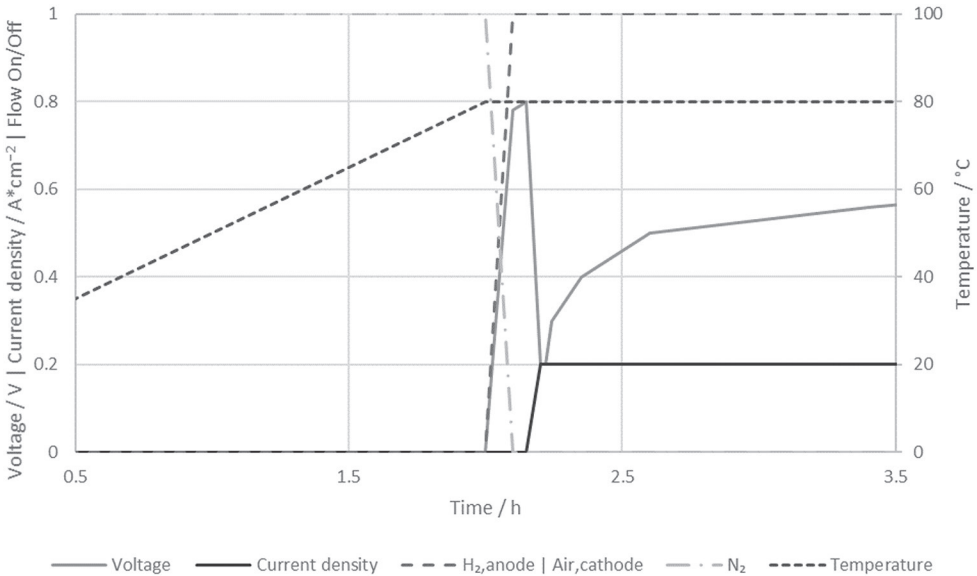


Fig. 2: Representation of a start up profile for PEFCs.

REFERENCES

- Bodner M., Senn J., & Hacker V. (2018). Degradation Mechanisms and Their Lifetime. *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*, 139–154. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00007-4>
- European Union. (2021). *DELIVERING THE EUROPEAN GREEN DEAL: THE DECISIVE DECADE - architecture*. July, 2021. <https://doi.org/10.2775/352471>
- Hacker V. & Mitsushima S. (2018). Fuel Cells and Hydrogen. In *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01053-7>
- Kocher K., Kolar S., Ladreiter W. & Hacker V. (2021). Cold start behavior and freeze characteristics of a polymer electrolyte membrane fuel cell. *Fuel Cells*, 21(4), 363–372. <https://doi.org/10.1002/fuce.202000106>
- Ladreiter W. (2020). *Startup and Shutdown Strategies with Oxygen Consumption for Polymer Electrolyte Fuel Cells*. Technical University Graz.
- The US Department of Energy (DOE). (2013). *Fuel Cell Tech Team Accelerated Stress Test and Polarization Curve Protocols for PEM Fuel Cells*. U. S. Dept. of Energy. http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint/archive/Files/49_2_Philadelphia_10
- Tsotridis G., Pilenga A., Marco G. & Malkow T. (2015). EU harmonised test protocols for PEMFC MEA testing in single cell configuration for automotive applications. In *EUR, Scientific and technical research series* (Vol. 27632). <https://doi.org/10.2790/54653>

CONTACT:

Dr. Merit Bodner
Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology
Graz University of Technology
Inffeldgasse 25C, 8010 Graz
Austria
Email: merit.bodner@tugraz.at

Integrated Hydrogen Energy Systems

Ch. Heschl

Fachhochschule Burgenland GmbH, Dep. Energy & Environment, Pinkafeld, Austria

N. Kirchknopf

Forschung Burgenland GmbH, Center for Building Technology, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: Due to the increasing share of volatile renewable energy sources, more flexibility and stability options are needed. In this context, scalable, long-term storage solutions based on Power to Gas (PtG) and Gas to Power (GtP) concepts remain a promising technology. The use of integrated high-temperature processes (IHTP) enables the avoidance of cost-intensive catalysts, the simultaneous increase of the overall efficiency and the utilization of a broader fuel spectrum range. Therefore, IHTP presents a significant contribution to the resilience of the future energy supply system.

1. INTRODUCTION

The European Decarbonization Strategy comprises two essential development phases of our future energy system. The first phase involves the increased use of intelligent linked sector coupling strategies based on already available and economically viable technologies. These include power-to-heat and power-to-cool solutions using heat pumps, as well as electro-mobility. The necessary legal framework to improve the competitiveness of such decentralized energy systems is currently under implementation (EU Directive, 2018). However, with the increasing integration of volatile energy sources such as solar and wind, long-term storage capacities in the form of power to gas (PtG) and gas to power (GtP) must also be integrated. For this reason, scalable, reversible fuel cell systems will be additionally required in the second development phase (slated for 2030, see Fig. 1).

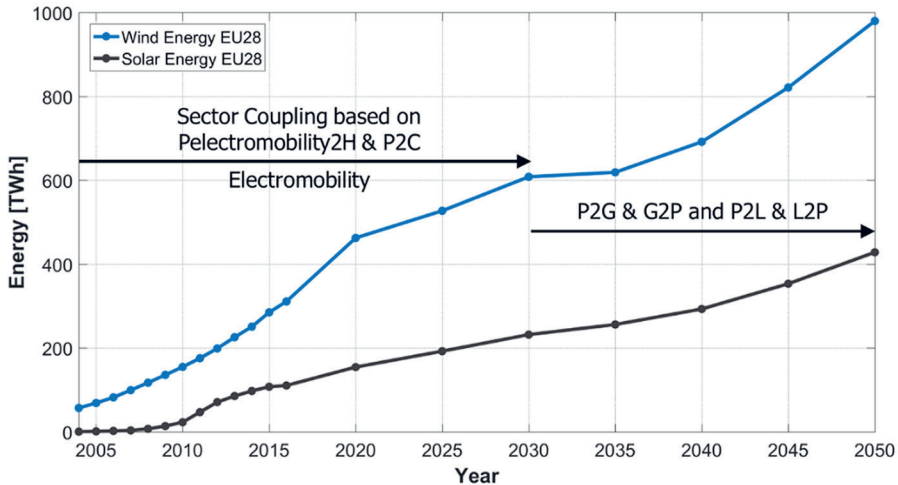


Fig. 1: Chronological development steps for the decarbonization of the EU28 energy system (Data basis: Europe 2018 and Eurostat 2018).

Long-term storage solutions are essential since the fluctuating power generator profiles contain a significant seasonal component. To offer complementary long-term storage services, the additional use of gaseous energy carriers in the form of PtG technologies is necessary (Jentsch, 2014). Currently, however, PtG storage technology is still in the development and demonstration phase, hence a need for further research is required primarily at the system but also the component level. Current developments are focused on energy carriers such as pure hydrogen or hydrocarbon compounds.

Hydrogen-based PtG storage technologies have several advantages: (1) The energy density is much higher than other energy storage media. (2) The stored hydrogen is a flexible energy storage medium that can be used for stationary applications (fuel cells, gas turbines, etc.) as well as for mobility (combustion engines, fuel cells, turbines, etc.). (3) The self-discharge rate is very low, making this technology suitable for seasonal or long-term storage applications. (4) The use of stack modules enables high scalability as well as compact design. The associated economies of scale for mass production will concurrently promise cost-efficient system solutions and a wide range of applications and performance. Thus, future decentralized performance requirements for energy storage capacities are realized “affordably”.

2. INTEGRATED HYDROGEN ENERGY SYSTEMS

An essential basis of PtG storage technology is the electrolysis of water into hydrogen and oxygen. According to the state of the art, alkali and polymer electrolyte membrane electrolysis processes are used for this purpose. However, high-temperature electrolysis with solid oxide cells (SOEC) is a promising alternative. In terms of thermodynamic conversion properties, this has significant potential for improving efficiency.

The total energy required in SOEC operation is almost independent of the process temperature used. However, as the temperature increases, the demand for electrical energy for hydrogen production decreases. The remaining energy requirement is covered with the aid of thermal energy (see Fig. 2).

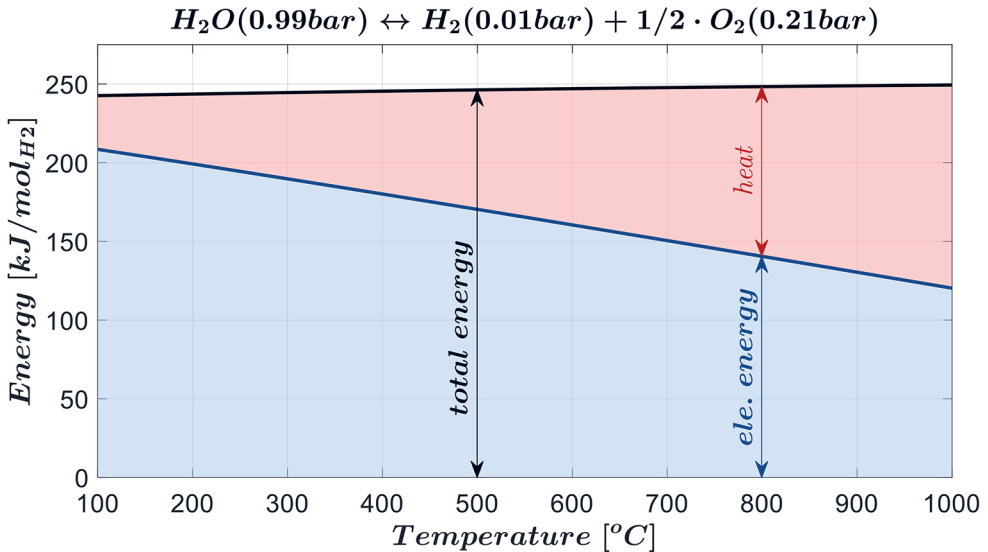


Fig. 2: Temperature dependence of the energy demand for hydrogen electrolysis (ideal process control, total pressure 1 bar).

Shifting energy demand in the direction of heat has significant advantages. On the one hand, available high-temperature waste heat potentials can be utilized with appropriate integration. On the other hand, the dissipation heat generated in the stack (due to activation and concentration losses, ohmic losses, etc.) can be used directly on site. In practical implementation, this allows a very efficient electrolysis operation. In addition, if CO₂ or CO sources are available, high-temperature electrolysis enables efficient methanation of the hydrogen. Thus, sector coupling strategies with new, diverse, feed-in structures into existing heat and gas grids can be promoted.

The components used in high-temperature electrolysis also allow fuel cell operation (SOFC operation) so that the hydrogen or hydrocarbon compounds produced can be converted back into electrical energy. Systems that can switch between electrolysis mode (SOEC) and fuel cell mode (SOFC) are referred to as reversible solid oxide cell (rSOC) systems. If pure hydrogen is used as the energy carrier, round-trip efficiencies of over 80% are achievable at an operating temperature of 600°C under ideal conditions. If hydrocarbon compounds are used, even higher round-trip efficiencies are attainable. The remaining energy is available as high-temperature waste heat and this can be temporarily stored and used for electrolysis or directly used for industrial processes and buildings (Heschl et al. 2017). Integrated rSOC system solutions can therefore achieve overall efficiencies of over 90%.

The ability to use a wide fuel band in SOFC operation and switch flexibly between electrolysis and fuel cell operation are vital reasons why rSOC is a promising technology for grid flexibility. In addition, the plant design is more compact compared to different system solutions and economies of scale of mass production can be used. In addition, alternating between electrolysis and electricity production increases operating times and hence economic efficiency.

Within the project FIRST (FIRST 2021), an integrated reversible high-temperature solid oxide system (rSOC) with a nominal power of 15 kW_{el} in SOEC operation and a nominal power of 5 kW_{el} in SOFC operation, will be developed. The chosen system design promises flexible integration (photovoltaic and wind farm / smart energy building / industry) and high scalability of the nominal power. In addition to thermodynamic system development, intelligent control algorithms are also being designed for optimal system integration. For demonstration purposes, a Smart Energy Building, the Living Lab ENERGETIKUM (ENERGETIKUM 2021) of the Forschung Burgenland GmbH is accessible for setting an integration scenario. Among other aspects, data-driven, model-based, predictive control algorithms are used to adapt the operating mode of the rSOC system and the load profile of the building as closely as possible to the yield of the photovoltaics and wind energy systems. The system development will be integrated, tested and validated in the Living Lab ENERGETIKUM between 2022 and 2023.

REFERENCES

- EU Directive (2018). DIRECTIVE (EU) 2019/944 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU.
- Jentsch M. (2014). Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern - Modellbasierte Analyse des markt- und netzzeitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem. Dissertation, Universität Kassel, ISBN: 3-8396-0865-1.
- FIRST (2021). FIRST Fully Integrated Reversible Solid oxide cell system. <https://www.energieforschung.at/projekte/1072/fully-integrated-reversible-solid-oxide-cell-system>.
- Heschl C., Klanatsky, P., & Peinsipp, M. (2017). SOFC-System Solutions for Residential Buildings. Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria. ISBN: 978-3-7011-0399-7.
- ENERGETIKUM (2021). Living Lab ENERGETIKUM. https://forschungsinfrastruktur.bmbwf.gv.at/de/fi/energetikum-living-lab_2655. 10/10/2021
- Europe (2018). EU Reference Scenario 2016. https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2016_en. 16/01/2018

Eurostat. (2018). Partial Provisional Results Short Assessment of Renewable Energy Sources. <https://ec.europa.eu/eurostat>. 16/01/2018

CONTACT:

Christian Heschl
Fachhochschule Burgenland
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld
Austria
Email: christian.heschl@fh-burgenland.at

Session 7a

TechFM4.0

Predictive Maintenance für Baukonstruktionen

Veitsberger, Markl / normsonst ZT GmbH / AT

IT-Security in der Gebäudetechnik

Waringer / Sauter Mess- und Regeltechnik GmbH / AT

Visible Light Positioning im smarten Gebäude – Lösungsansätze und Herausforderungen

Weiss, Fragner, Wenzl / JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mBH / AT

Predictive Maintenance für Baukonstruktionen

H. Veitsberger, J. Markl

normsonsult ZT GmbH, Großwilfersdorf, Österreich

ABSTRACT: The degradation process of building components and building structures lasts over a long period of time. It is characterized by many little changes and may end up in the failure of the construction. Currently facility management processes evaluate the construction condition based on the experience of the facility management professionals. These experts rely on their knowledge, specialist literature and manufacturers' data. In most cases service and maintenance works are done after fixed time intervals or after the partial or complete breakdown of the construction. Similar to processes in energy and building technologies, the usage of measured data for dynamic maintenance can help to audit the availability of facilities and as well, can influence their efficiency in operational life in an advantageous way.

A calculation method was developed, which is based on data for energy and environmental conditions. The designed factor was named „heat loss indicator“ (German: Wärmeverlustindikator, short: WVI). It was calculated exemplary for a factory building and a first analysis was made. With the help of the indicator the changes in the construction quality over three years could be represented in figures and the degeneration process could be pictured out.

In a second step the robustness of the heat loss indicator should be validated. In this paper the method is shown, as well as different calculations on various buildings over seven years data. The regarded building constructions were different in their mass – from light to heavy constructions – and in their usage. With the described method it was possible to depict the transformation of the building components. Degeneration, but also improvements through service and maintenance are visible in results.

To make the indicator resilient to short term changes filters were implemented. They screen internal heat losses, that could falsify the outcome.

Prospectively it should be possible to integrate the calculation of the heat loss indicator into existing processes and implement a real strategy for predictive maintenance.

1. EINLEITUNG

Die Degradation von Bauteilen und Baukonstruktionen ist ein über viele Jahre dauernder Prozess, gekennzeichnet von vielen kleinen Veränderung bis hin zum Versagen der Konstruktion. Bisher wurde die Zustands-Beurteilung von Konstruktionen meist durch Fachpersonen, basierend auf deren Expertise, Fachliteratur und Herstellerangaben durchgeführt. Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen zumeist in festgelegten Intervallen oder nach dem teilweisen oder ganzheitlichen Versagen der Anlagen. Ähnlich wie in der Gebäudetechnik soll/wird angestrebt durch Ermittlung eines auf Messdaten basierenden Zustandswertes den aktuellen Zustand der Baukonstruktion zu ermitteln. Mit diesem Wissen kann ein System für Predictive Maintenance für Baukonstruktionen eingeführt werden um dynamisch die notwendigen Wartungs- und Instandhaltungszyklen zu bestimmen.

In einem ersten Anlauf wurde eine Methodik entwickelt und basierend auf Energieströmen und Umgebungsbedingungen eine Kennzahl, genannt Wärmeverlustindikator (WVI), bestimmt. Am Beispiel einer Industriehalle konnte bereits eine Veränderung der Konstruktion über drei Jahre gezeigt werden.

In einem zweiten Schritt wurden nun die Datensätze erweitert um die Methode zu validieren und robuster zu gestalten. Die Berechnung des WVI für fünf baulich verschiedene Hallen über sieben Jahre ermöglichte die Verifizierung der Methode. Außerdem wurde die Faktoren „Datenqualität“ und „interne Lasten“ hinsichtlich ihres Einflusses auf die Ermittlung des WVI untersucht.

2. GRUNDLAGEN

2.1 DEGRADATION VON BAUKONSTRUKTIONEN

Die Degradation von Baukonstruktionen ist ein über viele Jahre dauernder Prozess, der durch kleine Veränderungen über große Zeitspannen charakterisiert ist.

In Abb. 1 ist beispielhaft ein solcher Verlauf aus der Literatur skizziert. Der Errichtungszustand wird als Sollzustand bezeichnet. Durch den Abnutzungsvorgang wird dieser Zustand verlassen und es kommt über die Jahre zu einer Verschlechterung des Zustandes. Durch Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen soll dieser Abnutzungsvorgang gebremst oder teilweise rückgängig gemacht werden. Vor allem am Anfang der Lebensdauer kommt es zu einer relativ zügigen Degradation, danach nimmt die Abnutzungsgeschwindigkeit ab bis das letzte Drittel der Lebens- oder Nutzungsdauer erreicht wird. In dieser Zeitspanne kommt es zur rapiden Verschlechterung der Konstruktion bis hin zum Ausfall nach einem Schadenseintritt.

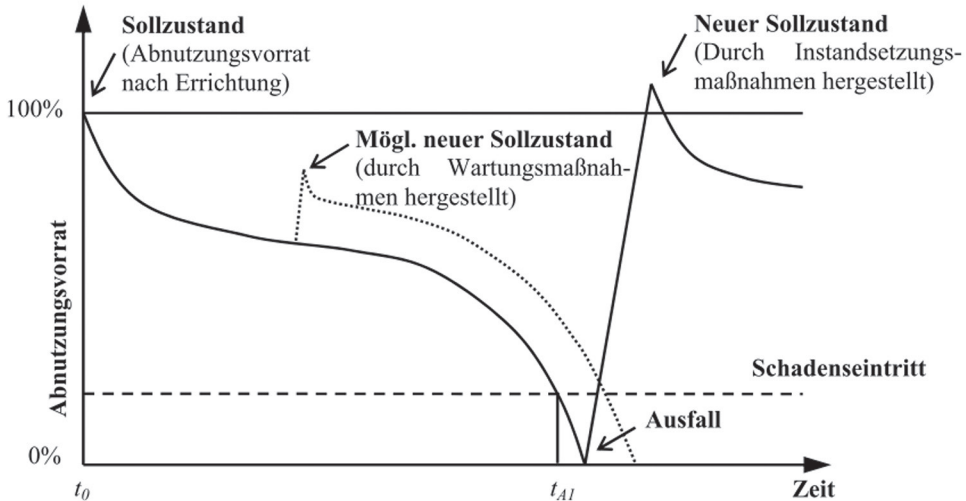


Abb. 1: Theoretischer Verlauf der Abnutzung eines Bauteils (Ritter 2011)

Durch dynamische, auf Messdaten basierende Wartungszyklen soll dieser Punkt des Abfallens rechtzeitig erkannt werden und durch gezielte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend den übergeordneten strategischen Facility Management Zielen verhindert oder in geeignetem Maßstab gebremst werden.

2.2 DEFINITION FÜR WÄRMEVERLUSTINDIKATOR (WVI)

Der Wärmeverlustindikator beschreibt die Qualität einer Hüllkonstruktion durch die Menge an Wärmeverlust durch die Hülle im Verhältnis zu den Umgebungsbedingungen und unter Filterung von verschiedenen Faktoren. Die für die Berechnung und Bewertung notwendigen Daten sind unter anderem:

- Thermische Energieströme im System
- Umgebungsbedingungen
- Elektrische Energieströme im System
- Interne Lasten

- Nutzungsdauer und Nutzungszeiten
- Wissen über die Schwere der Baukonstruktion
- Nutzerverhalten
- [...]

Diese Daten werden über bereits vorhandene Daten aus der Gebäudeleittechnik, Messdaten, Daten aus der (Energie-) Buchhaltung und von Energieabrechnungen oder durch Befragung der Nutzer generiert.

In Abb. 2 ist eine Berechnung eines solchen Kennwertes beispielsweise angegeben. In dieser Bewertung wurde der WVI für eine Fabrikhalle in den Jahren 2018-2020 ermittelt. Variiert wurden die Faktoren „Zeit“ und „Energieströme“. OZ bedeutet „ohne Zeiteinschränkung“ (siehe durchgängige Linien) und bedeutet eine Auswertung von Daten aus 24 Stunden pro Tag, ZE bedeutet eine „Zeiteinschränkung“ in der Auswertung auf den Zeitraum außerhalb eines dynamisch beeinflussten Nutzungsregimes. Die Abkürzung PE weist darauf hin, dass die „Prozessenergie“ (interne Lasten, siehe gestrichelte Linien) in den Energieströmen mitberücksichtigt wurde.

In allen Bewertungen konnte ein Ansteigen des WVI und somit eine Degradation der Konstruktion in den drei ausgewerteten Jahren festgestellt werden, je nach Berechnungsmethode mit unterschiedlicher Stärke.

Mit der Überwachung der Messdaten über mehrere Jahre können sich damit zuverlässige Aussagen über die Performance der Gebäudehülle machen lassen und der tatsächliche Ist-Zustand schneller bewertet werden. Die Berechnung des WVI erweist sich tendenziell als robuste Methode, da kurzfristig beeinflussende Effekte keine signifikanten Einflüsse auf die grundsätzliche Tendenz haben. Es können die vorliegende Datenaufzeichnung bis zu einem gewissen Grad sogar lückenhaft sein. Im Vergleich zur Energiebilanzierung können unbekannte Effekte wie manuelles Eingreifen in die gebäudetechnische Anlage (beispielsweise Abschalten der Lüftungsanlagen nach Empfinden) zu keiner beziehungsweise nur zu geringen Verschiebungen der Werte führen.

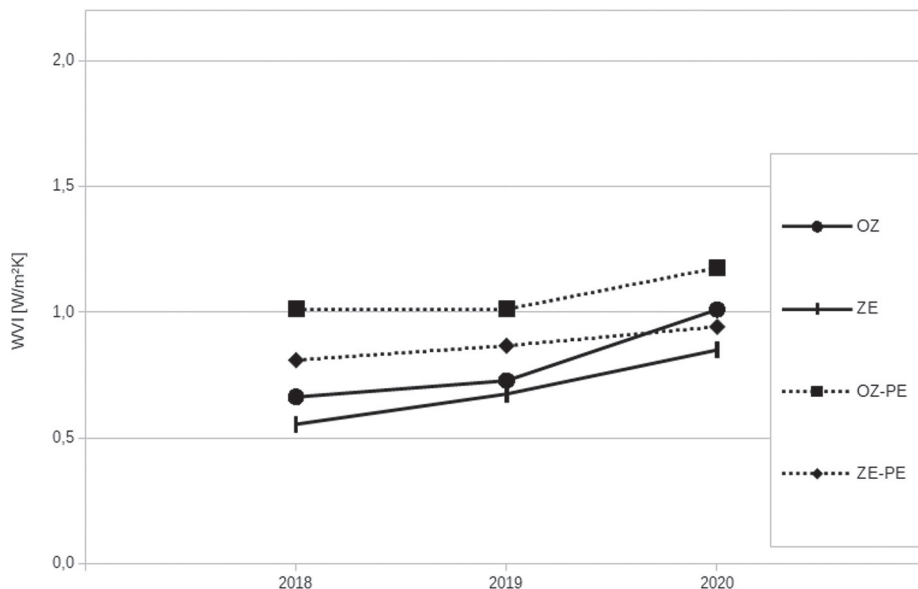


Abb. 2: WVI einer Industriehalle bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden (Veitsberger & Markl 2020)

Dieser erste Ansatz dient als Grundlage für die Weiterentwicklung der Methode. Insbesondere die Robustheit gegenüber kurzfristigen Veränderungen und der Qualität der Daten soll aufgezeigt werden.

3. WVI – EVALUIERUNG DER ROBUSTHEIT

Nach der Definition des WVI im ersten Schritt, erfolgte in einem weiteren Schritt die Validierung des Faktors. Zu diesem Zweck wurden Daten von fünf Industriehallen in Graz über einen Zeitraum von sieben Jahren ausgewertet. Die Hallen unterscheiden sich in der Bauweise (schwer und leicht) und Größe (5.000 m² bis 30.000 m²). Die Nutzung ist tendenziell ähnlich in allen Hallen: es handelt sich um Assemblierungstätigkeiten mit geringen bis mittleren inneren Wärmelasten. Bei einigen Hallen wurden, nach noch nicht bestätigten Angaben des Nutzers, auch wärmeintensivere Tätigkeiten durchgeführt, wie Schweißen oder Stanzen.

Bei dieser vorliegenden Auswertung standen Daten zu Energieströmen in den untersuchten Bereichen und Umgebungsbedingungen zur Verfügung. Daten für interne Lasten oder die Nutzerverhalten waren nicht Teil der Auswertung, lediglich die Aussagen der Nutzer wurden zur Bewertung herangezogen.

Für die vorliegende Untersuchung wurden exemplarisch zwei der fünf Hallen ausgewählt.

- Halle A: Die Grundfläche beträgt ca. 30.000 m², die Bauweise kann als schwer bezeichnet werden.
- Halle E: Die Grundfläche beträgt ca. 5.000 m², die Bauweise kann als leicht bezeichnet werden.

3.1 DYNAMISCH & QUASISTATISCH

Die Berechnungen des WVI wurden für dynamische und quasistatische Zustände gemacht. In dieser Unterscheidung geht es darum die Auswirkungen vorhandenen interne Lasten, beispielsweise durch Personenanzahl oder Prozesse, zu beurteilen. Außerdem wird angenommen, dass auch eine solare Einstrahlung einen Unterschied ergeben kann.

- Dynamische Zustand: Erfassung der thermischen Energieströme ins System, mit geringer Filterung der internen Lasten; geringe Filterung für solare Einstrahlung
- Quasistatischer Zustand: Erfassung der thermischen Energieströme in das System unter größerer Filterung der internen Lasten; Filterung für solare Einstrahlung vorhanden

Am Beispiel von Halle A (siehe dazu Abb. 3) und Halle E (siehe dazu auch Abb. 4) werden die Aussagen der beiden Berechnungsmethoden näher verglichen. In beiden Abbildungen ist nicht der Absolutwert für den WVI dargestellt. Da es um die Veränderung der Qualität der Bausubstanz geht, ist die Veränderung des Wertes, bezogen auf den Ausgangswert vom Jahr 2014, in Prozenten dargestellt.

Im direkten Vergleich gibt es sowohl Unterschiede, als auch Ähnlichkeiten im Verlauf für die dynamische und die quasistatische Berechnung.

Für die Halle A kann festgestellt werden, dass es nach einer anfänglichen Erhöhung des Wertes bis 2015 bzw. 2016 zu einem Abfallen kommt. Dies kann auf eine Verbesserung der Bauteilqualität hinweisen. Bis zum Jahr 2018 ist der Wert am niedrigsten und steigt danach bei beiden Berechnungsmethoden, jedoch in unterschiedlicher Stärke, wieder an.

Durch die Befragung der Nutzer konnte festgestellt werden, dass es im Jahr 2016 und 2017 zu einer Verbesserung im Heizungssystem und der damit einhergehenden Sanierung von Bauteilen gekommen ist. Nach 2018 gab es wieder einen Anstieg des Wertes, was auf eine Degradation hinweist. Dieser Anstieg ist je nach Berechnungsmethode unterschiedlich stark. Laut dem Nutzer gab es ab 2018 zusätzlich eine Erhöhung der Produktion. Dies einher mit einer Erhöhung der internen Lasten, welche in der Auswertung inklusive der dynamischen Effekte nun deutlich erkennbar sind.

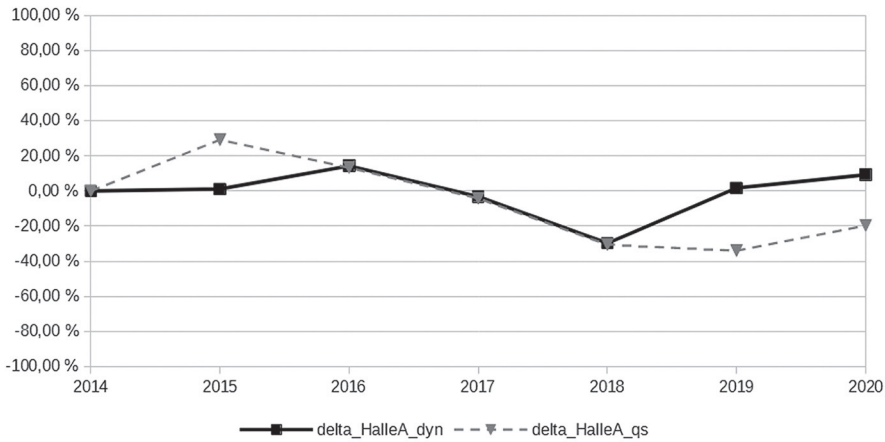


Abb. 3: Änderung des WVI in Prozent bezogen auf den Ausgangswert, Vergleich der dynamischen und quasistatischen Berechnungsmethode für Halle A

Am Beispiel von Halle E kann man erkennen, dass im Jahr 2018 der Wert, sowohl für die dynamische, als auch die quasistatische Methode am niedrigsten ist. Dies deutet darauf hin, dass es in diesen Jahren nicht zu einer Degradation der Baukonstruktion gekommen ist, sondern, deuten auf eine Verbesserung hin. Durch die nachträgliche Nutzerbefragung konnte festgestellt werden, dass es ab dem Jahr 2012 an diesem Gebäude eine permanente Verbesserung der Bauteilqualität durch eine über mehrere Jahre dauernde Sanierung des großflächigen Daches (ca. m² bzw. % der luftberührten Außenhülle) gegeben hat.

Es ist auch zu erkennen, dass der Verlauf der quasistatischen Berechnung im Jahr 2017 hin zum Jahr 2018 eher sprunghaft ist, während es bei der quasistatischen Berechnung ein kontinuierliches Abfallen ab 2015 zu sehen ist. Durch Nutzerbefragung hat sich ebenfalls ergeben, dass die Produktion im Jahr 2018 wesentlich geringer war, als im Jahr 2017. Dieser Sprung ist in der dynamischen Berechnungsmethode deutlich erkennbarer, da hier nicht näher auf die Filterung von internen Lasten Rücksicht genommen wird.

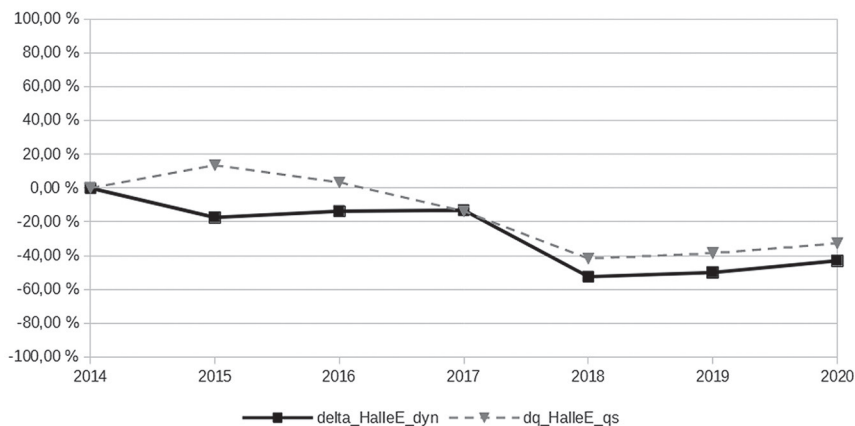


Abb. 4: Änderung des WVI in Prozent bezogen auf den Ausgangswert, Vergleich der dynamischen und quasistatischen Berechnungsmethode für Halle E

Die Diagramme zeigen, dass Änderungen in der Konstruktion durch vorhandene Daten sichtbar gemacht werden können.

- Es können sowohl Degradation, als auch Verbesserungs- und Instandhaltungsmaßnahme detektiert werden.
- Die Änderungen der internen Lasten werden ebenfalls in der Berechnung abgebildet, können aber durch Filterung mittels quasistatischer Methode minimiert werden.

Durch Rücksprache mit den Nutzern wurde klar, dass Daten über die Nutzung und über interne Lasten ein weiteres Asset bei der Anpassung der Methodik sein können.

3.2 DATENQUALITÄT

Die Bewertung durch den WVI beinhaltet auch die Bewertung der Qualität der Primärdaten. In Abb. 3 ist im Diagramm die erhaltene Datenqualität als Prozent verwertbarer Datentripel in Bezug zu einem Ideal-Wert angegeben. Die Qualität wird für dynamische und quasistatische Methode angezeigt. Im Jahr 2015 und 2018 ist dieser Wert bei beiden Berechnungsmethoden am geringsten, da für diese Jahre die geringste Anzahl an Primärdaten zur Verfügung standen.

Dies zeigt, dass auch bei vergleichsweise niedriger Quantität der Daten, dennoch aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können.

Zum zweiten zeigt es auch, dass die Qualität der zukünftig gesammelten Daten verbessert werden kann, wenn bei der Datenaquise auch auf Predictive Maintenance für Baukonstruktionen geachtet wird.

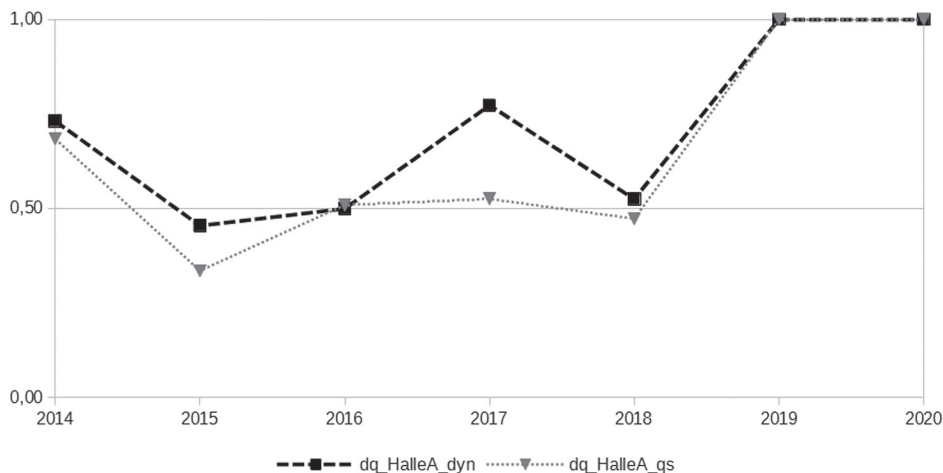


Abb. 5: Vergleich der Datenqualität bei dynamischer und quasistatischer Berechnungsmethode, beispielhaft für Halle A

4. ERGEBNISSE & AUSBLICK

In der Auswertung für die größere Halle A kann festgestellt werden, dass die Berechnung des WVI auf eine Verbesserung der Bauteilqualität ab dem Jahr 2014 hinweist. Diese Annahme wurde durch Befragung der Nutzer bestätigt. Ebenso konnten dynamische Effekte, wie der Produktionsrückgang und die damit einhergehenden geringeren internen Wärmelasten, dargestellt und validiert werden.

Für die kleinere Halle E wurde eine Verbesserung der Bauteilqualität durch den WVI detektiert. Diese Annahme konnte ebenso durch die Befragung der Mitarbeiter bestätigt werden. In den Zahlen wurden die Effekte der Sanierungsarbeiten abgebildet.

Zusammenfassend konnte die Bewertung der Degradation von Baukonstruktionen durch den Wärmeverlustindikator (WVI) in einem weiteren Schritt verbessert und konkretisiert werden. In der Auswertung konnten sowohl Degradation als auch Verbesserungs- und Instandhaltungsmaßnahmen dargestellt und begründet werden. Mittels Überwachung der Messdaten über mehrere Jahre können sich so zuverlässige Aussagen über die Performance der Gebäudehülle machen lassen. Auch bei teilweise geringer Qualität der Primärdaten kann der Zustand der Konstruktion repräsentativ wiedergegeben werden. Dadurch konnte die Robustheit der Methode auch gegenüber kurzfristig beeinflussenden Effekten abgebildet werden.

Mittels weiterer Auswertungen von Gebäuden mit unterschiedlichen Typologien, verschiedenere Nutzung und an diversen Standorten soll die Methode weiter verbessert und validiert werden.

LITERATUR

- Ritter F. (2011) Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen Modellierung und Praxisnahe Prognose, Dissertation. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Deutschland
- Veitsberger H., Markl J. (2020) Ein Weg zur messdatengestützten bautechnischen Bauteilinspektion, Kongressbeitrag, In: Tagungsband enova2020 Technologie- und Klimawandel, Band 24, Gremmel-Simon H. (Hrsg.), Department Energie & Umwelt, Fachhochschule Burgenland GmbH, Standort Pinkafeld, Leykam Buchverlagsgesellschaft m.b.H., Graz

KONTAKTDATEN:

Dipl.-Ing. Hannes Veitsberger
Hainersdorf 6
8264 Großwilfersdorf
Email: veitsberger@normconsult.at

IT-Security in der Gebäudetechnik

A. Waringer

Sauter Mess- und Regeltechnik GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: IT-security in building technology gains constantly an importance due to the increasing automated processes. Digital direct controller (DDC) are nowadays embedded systems which contain sensitive data. Additionally they can be in charge for critical infrastructure, i.e. air conditioning in industrial processes which in turn is heavily depending on the quality of a production charge or other security-related devices. The use of common IT-standards i.e. encryption of data communication, authentication methods based on certificates and so forth can be necessary to secure these environments. This paper uses different approaches for demonstrating solutions for the implementation of a higher IT-security-level.

First, the threat potentials are addressed. Afterwards the separation of IT and OT networks will be discussed. Next, the Transport Layer Security (TLS) protocol will be introduced. However, the main focus is set on the encryption with BACnet/SC as well as a presentation of a blockchain implementation for higher data integrity. This paper closes with a conclusion of the displayed methods.

1. EINLEITUNG

Der Auslöser für die wachsende Bedeutung und die Aktualität des Themas IT-Sicherheit in der Gebäudeausrüstung liegt in der technologischen Entwicklung. In der gesamten Automatisierungstechnik wird seit längerer Zeit immer mehr Intelligenz in immer tieferen Prozessebenen verbaut. SPS und Automationsstationen haben sich längst zu branchenspezifischen Kleincomputern mit eingebettetem Betriebssystem entwickelt. Für die Kommunikation wurden als Folge weitgehend die bestehenden Technologien der allgemeinen IT (z.B. Ethernet) übernommen (vgl. Granzer et al. 2010). *BACnet (Building Automation and Control Network) wurde als interoperables Kommunikationsprotokoll für die Automations- und Managementebene der Gebäudeautomation entworfen.* (Baumgarth et al. 2004, S.208)

Für spezifische Einsatzzwecke können jedoch auch andere Busprotokolle eingesetzt werden. So kann für die Lichtsteuerung z.B. der Dali-Bus zum Einsatz kommen, während hingegen bei Zählern der M-Bus als prominenter Vertreter gilt.

Durch die Nutzung allgemeiner IT-Standards für die Kommunikation, wurde die Integration der Gebäudeautomation (GA) in die bestehenden Strukturen der Business-IT eines Gebäudes ermöglicht. Für die Fernkommunikation hat sich die Nutzung des Internets etabliert, womit sich der GA fast unbegrenzte Kommunikationsmöglichkeiten eröffnet haben (vgl. Berling et al. 2009, S.272). Aufgrund dieser Thematik und der Tatsache, dass BACnet/IP-Netzwerke nicht mehr physikalisch von der Office-Netzwerkinfrastruktur getrennt sind, gab es auch konkrete Anforderungsprofile an das BACnet Protokoll. So soll das Busprotokoll zukünftig den Regeln der gemeinsam verwalteten IP-Netzwerkinfrastrukturen unterliegen (vgl. Wang 2010, S 241). Durch die physische Verbindung der Gebäudeautomation mit den technischen Einrichtungen eines Gebäudes ergibt sich jedoch, gegenüber der allgemeinen IT, eine erweiterte Dimension bei den Folgen dieser Verwundbarkeit. Nicht „nur“ Daten können manipuliert oder geändert werden. Ein unerwünschter Zugriff kann sich bis hin zu den sicherheitsrelevanten technischen Einrichtungen des Gebäudes auswirken. Bei krimineller Absicht können die Folgen entsprechend schwerwiegend sein (vgl. Granzer et al. 2006, S 1).

Daraus resultierend muss zum einen eine Verschlüsselung der Datenkommunikation und zum anderen die Integrität der Daten gewährleistet werden können. Auch ein Autorisierungs- und Authentifizierungsmechanismus muss implementiert werden. Die Lösung für die Beschränkung der Autorisierung und Verschlüsselung wird BACnet Secure Connect (BACnet/SC) genannt. Das Themengebiet der Integrität und Verbindlichkeit (Nichtabstreitbarkeit) kann mittels Blockchain-Technologie abgedeckt werden. Hier gilt es primär den Schutz vor Änderungen der Geräteparametrierung (direkte Geräteangriffe) gewährleisten zu können, da der BACnet/SC Standard und seine Zertifikate keine Informationen über veränderte Systemparameter oder Änderungen in der Geräteparametrierung erkennen kann. Der Lösungsansatz dieser Arbeit beinhaltet somit die Integration von gängigen IT-Standards (Trennung IT/OT, TLS), die Verschlüsselung der Datenkommunikation (BACnet/SC) und abschließend die Sicherstellung der Datenintegrität mittels Blockchain-Technologie.

ABGRENZUNG

Dieses Paper behandelt ausschließlich das Szenario gegen unerwünschte Eingriffe/Angriffe von außen im Themenbereich der IT-Sicherheit. Den Aspekt der IT-Verfügbarkeit (sicher im Sinn von fällt nie aus, stürzt nie ab, Redundanz und Ähnlichem), die oft auch als Bestandteil dieses Themas angesehen wird, muss separat betrachtet werden. Auch der Aspekt der Sicherheit der HLK-Anlage selbst (z.B. Notstromversorgung, Hardwareverriegelungen, Redundante Ausführung von Anlageteilen) wird insoweit angesprochen, als er bei einem Ausfall der Steuerung der Schadensminderung dient.

2. STAND DER TECHNIK

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Bedrohungspotenziale sowie gängige Gegenmaßnahmen bzw. Kommunikationssicherung der Informationstechnologie abgebildet. Der Schwerpunkt dieses Abschnittes liegt auf der Präsentation von gängigen IT-Bedrohungen sowie der Entschärfung dieser Potenziale.

2.1 BEDROHUNGSPOTENZIALE

Heutzutage ist es kaum möglich, alle Bedrohungspotenziale - im Zusammenhang mit IT-Security – abzubilden. Die Nutzung des Gebäudes sowie die Implementierung der Software und Funktionen sind die wesentlichsten Faktoren bei der Bewertung der Bedrohungspotenziale. Das primäre Ziel ist unautorisierten Zugriff auf die Anlage zu vereiteln.

Automationsgeräte kommunizieren primär über verteilte Netzwerke. Die Regellogik ist im Regelgerät hinterlegt. Jedoch werden viele Informationen über unterschiedliche Automationsgeräte verteilt genutzt. So sind klassische Beispiele für kommunikative Datenpunkte der Außentemperatur- und/oder -feuchte-Wert. Diese Daten werden zentral an einem Automationsgerät gesammelt und dann dem Automationsnetzwerk zur Verfügung gestellt. Dieses Szenario zeigt gleich zwei mögliche Angriffspunkte für ein Eindringen in ein System. Zum einen kann ein netzwerkbasierender Angriff gestartet werden, sodass die übermittelten Daten manipuliert oder abgefangen werden können. Zum anderen besteht ein direkter Angriffsversuch auf das Automationsgerät, welches die Daten zentral zur Verfügung stellt. Beide Möglichkeiten haben denselben Effekt, denn es wurden ungewollt Informationen manipuliert. Die unterschiedlichen Zugänge zu den Angriffsszenarien können Abb. 1 entnommen werden (vgl. Granzer et al. 2010).

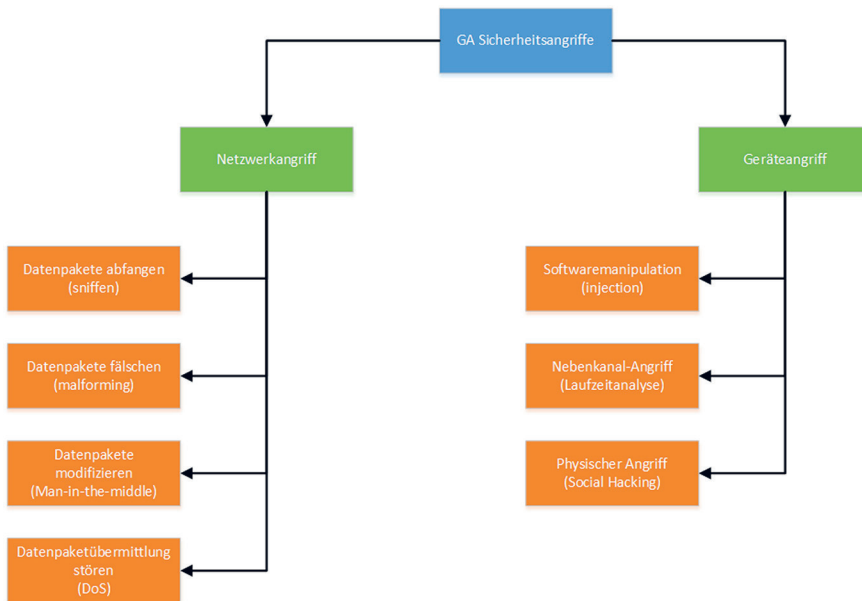


Abb. 1: beispielhafte Angriffsmethoden (modifiziert nach Granzer et al. 2010)

Es sei noch einmal explizit erwähnt, dass die vorhergehende Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit besitzt. Ziel dieser Darstellung ist es ein grundlegendes Verständnis der Möglichkeiten zur Manipulation von Informationen zu erhalten. Die Bedrohungspotenziale müssen jeweils pro Gebäude und System bewertet werden.

2.2 TRENNUNG IT/OT

Wie schon in der Einführung erörtert, ist die physikalische Trennung der bauseits zur Verfügung gestellten Netzwerke und der technischen Gebäudeausrüstung nicht mehr erwünscht. Zum heutigen Zeitpunkt werden diese beiden Netzwerksegmente zumeist mittels «Virtual Local Area Networks» (VLAN) getrennt. Ein VLAN ist ein logisches Teilnetz innerhalb eines Switches bzw. eines gesamten physischen Netzwerks. Ziel dieser Anbindung ist die netzwerktechnische Trennung von Segmenten, sodass z.B. Datenpakete nicht über mehrere Netzwerkbereiche zur Verfügung stehen (vgl. Kizza 2020, S 470).

Es ist die Rede von IT- und OT-Netzwerken. Ein IT-Netzwerk kann wie folgt definiert werden: *Das gesamte Spektrum an Technologien zur Datenverarbeitung, wie Software, Hardware, Kommunikationstechnologien und damit verbundene Services. In der Regel umfasst IT keine eingebetteten Technologien, die keine Daten für den Einsatz im Unternehmen generieren.* (Lachance 2021)

Ein OT-Netzwerk ist wie folgt definiert: *OT ist Hardware und Software, die eine Änderung durch die direkte Überwachung und/oder Kontrolle von physikalischen Geräten, Prozessen und Ereignissen im Unternehmen erkennen oder verursachen.* (Lachance 2021)

Vergleicht man diese zwei Aussagen, so kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass einzelne ausgewählte Funktionen im IT-Netzwerk zur Verfügung stehen wie zum Beispiel ein integrierter Webserver, die Datenverarbeitung und –kommunikation jedoch dem OT-Netzwerk unterliegen. Ein Praxisbeispiel zeigt den genauen Unterschied. Ändert sich zum Beispiel der Außentemperaturwert von 22 °C auf 23 °C so wird dies mittels Datenpaket an alle notwendigen OT-Teilnehmer weitergeleitet. Die Informationen werden verarbeitet und verteilt. Wenn sich dieser Wert nun auf 24 °C erhöht wird ein neues Datenpaket im OT-Netzwerk abgesetzt. Nun möchte der Nutzer möglicherweise den integrierten

Webservers mittels IT-Netzwerk abfragen. Das Ergebnis ist eine Darstellung der Wertes 24 °C ohne den genauen Datenverkehr abzubilden. Nachdem das Datenpaket für den IT-Nutzer nicht bekannt ist, kann es weder manipulieren noch abfangen, sondern lediglich darstellen lassen.

Die Trennung von Darstellung und Datenverkehr ist ein wesentlicher Bestandteil der IT-Sicherheit. So kann einer Manipulation von netzwerktechnischen Informationen vorgebaut werden. Somit sollte bei modernen Automationsgeräten eine IT- bzw. WAN-Schnittstelle und mehrere OT- bzw. LAN-Schnittstellen implementiert sein. Ein Beispiel kann Abb. 2 entnommen werden.

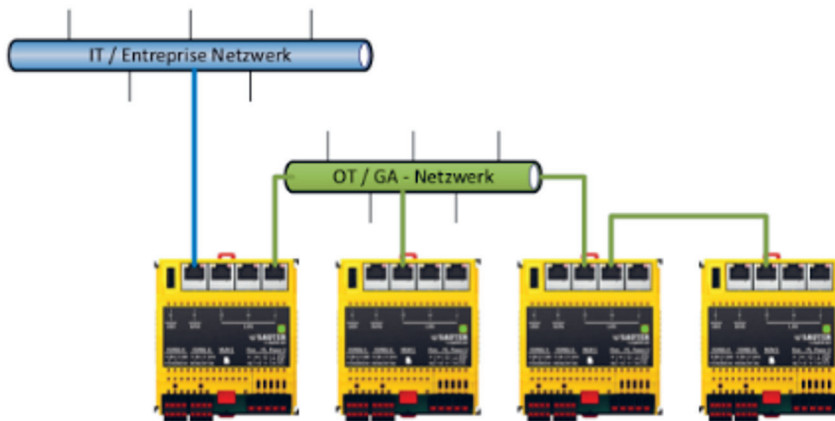


Abb. 2: Beispiel Trennung IT/OT

2.3 TRANSPORT LAYER SECURITY (TLS)

Das TLS-Protokoll wie in [RFC 4346] spezifiziert ist ein Protokoll zur Gewährleistung vertraulicher, authentifizierter und integritätsgeschützter Ende-zu-Ende-Datenübertragungen. (Kappes 2007, S 265)

Dabei steht die Abkürzung für «Transport Layer Security». Das Sicherheitsprotokoll ist auf der Transportschicht gemäß dem ISO/OSI-Modell lokalisiert. Auch das TCP-Protokoll befindet sich auf derselben Schicht.

Das Grundprinzip basiert darauf, dass jene Informationen die aus der Anwendungsschicht an die unterliegenden «Layer» übergeben werden, verschlüsselt und anschließend an das TCP-Protokoll zur weiteren Verarbeitung übergeben werden. Im TLS-Protokoll kommen symmetrische kryptographische Verfahren zum Einsatz, welche Hashwerte zur Überprüfung der Datenintegrität zur Verfügung stellen. TLS erlaubt die Verwendung vieler verschiedener kryptographischer Verfahren zur Verschlüsselung und zur Integritätsüberprüfung. Diese werden zu Beginn der Session über das Handshake Protocol ausgehandelt (vgl. Kizza 2020, S 370ff).

Das Prinzip beinhaltet, dass der Server sich beim Client authentifizieren muss. Eine Authentifikation des Clients via Zertifikat ist zwar möglich, aber nicht zwingend notwendig. Der Server stellt somit das Zertifikat dem Client zur Verfügung. Wenn dieses Zertifikat in der Liste von vertrauenswürdigen Zertifikaten aufliegt ist der Authentifizierungsvorgang erfolgreich abgeschlossen. Falls das Zertifikat nicht vertrauenswürdig ist kann eine Alarmierung des Benutzers mit weiteren Anweisungen (z.B. Abbruch der Verbindung) erfolgen.

3. BACNET/SC

Der herstellerübergreifende Kommunikationsstandard BACnet stellt damit eine Sicherheitsinfrastruktur zur Verfügung. Die Lösung für die Beschränkung der Autorisierung und der in der Vergan-

genheit nicht vorhandenen Verschlüsselungsthematik wird BACnet Secure Connect (BACnet/SC) genannt.

Die Kommunikation erfolgt mittels dem TCP-Protokoll mit der Nutzung von WebSockets. Diese arrivierten Mechanismen, basierend auf dem IP-Protokoll löst somit die bisherige UDP/IP-Struktur des BACnet ab. Für die Authentifizierung soll standardmäßig TLS zum Einsatz kommen, welche auch gleichzeitig die Basis für den sicheren Webzugriff über „https://“ zur Verfügung stellt. Desweiteren kann optional eine 128- oder 256-Bit-Verschlüsselung zum Einsatz kommen. Zu diesem Zweck gibt die BACnet Norm einen neuen Data Link Layer als Sicherheitsmechanismus vor. Ein Beispiel mit dem Vergleich des ISO/OSI-Modells kann Abb. 3 entnommen werden (vgl. ASHRAE Special Publications 2019, S 5).

BACnet Layers								OSI Layers	
BACnet Application Layer								Application	
BACnet Network Layer								Network	
ISO 8802-2 (IEEE 802.3) Type 1		MS/TP	PTP	LonTalk	BVLL (Annex J)	BVLL (Annex U)	BZLL	Secure Connect BVLL (Annex YY)	Data Link
ISO 8802-3 (IEEE 802.3)	ARCNET	EIA-485	EIA-232		IPv4	IPv6	Zigbee	WebSocket	Physical

Abb. 3: BACnet Architektur (ASHRAE Special Publications 2019, S.9)

Die Verschlüsselung erfolgt mittels den validierten digitalen Zertifikaten, welche unternehmensweit aufgebaut sind. Der Aufbau der Public-Key-Infrastruktur ist dabei nicht durch die DIN EN ISO 16484-5 vorgegeben, sondern unterliegt den Zertifizierungs- und Registrierungsstellen.

Der grundsätzliche Ansatz für die Entwicklung von BACnet/SC waren einige IT-technische Schwächen des BACnet Protokolls. Daher kommen praxistaugliche Mechanismen und Sicherheitsfunktionen zum Einsatz, sodass den IT-Richtlinien genüge getan wird. Folgende Problemstellungen können durch BACnet/SC gelöst werden:

- BACnet/SC nutzt weitverbreitete Sicherheitsmechanismen für die Kommunikation über Netzwerken, welche von der IT-Branche akzeptiert sind.
- BACnet/SC benötigt keinen statischen IP-Adressbereich, sodass der administrative Aufwand für Netzwerktechniker reduziert wird. Außerdem wird dadurch das «BACnet/IP Broadcast Management Devices» (BBMD) obsolet.
- BACnet/SC stellt verbesserte Funktionalitäten zur Nutzung der bestehenden Firewalls zur Verfügung.

Die Buskommunikation erfolgt nun mittels einem zentralen BACnet/SC Hub, welcher die Datenpakete an die dazugehörigen Teilnehmer/Knoten weiterleitet. Wobei ein Knoten ein kommunikatives Peripheriegerät oder einen komplexen Regler darstellen kann. Außerdem analysiert der Hub die Datenpakete und verteilt, sofern notwendig, einzelne Informationen an das ganze BACnet Netzwerk. Daraus resultierend stellt der Hauptangriffspunkt der Kommunikation nun der BACnet/SC Hub dar. Bei einem technischen gebrechen, Wartungsarbeiten oder sonstigen Verlust der Konnektivität sind die Querkommunikationen im Automationsnetzwerk ebenfalls betroffen. Daher sieht der Standard eine Failover-Möglichkeit vor. Hierzu muss ein Failover-Hub in der Topologie vorgesehen werden, sodass im Fehlerfall die Redundanz die Aufgaben des Haupt-Hub automatisch übernimmt. Eine beispielhafte Illustration kann Abb. 4 entnommen werden.

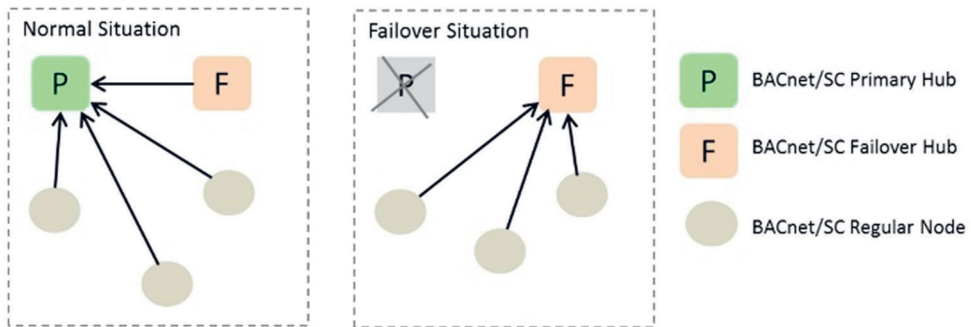


Abb. 4: BACnet/SC Hub und Failover-Szenario (Osborne & Fisher, 2018)

Aufgrund von IT-Richtlinien ist eine sichere BACnet-Kommunikation an verteilten IP-Netzwerken zunehmend gefordert. Daher sollten alle BACnet-Teilnehmer BACnet/SC-fähig sein, sodass diesem Anforderungsprofil genüge getan werden kann.

4. BLOCKCHAIN

Die Blockchain-Technologie fand ihren ersten Einsatzzweck in der Finanzwelt in Form von Kryptowährungen (z.B. Bitcoins). Die Integrität der Datenübertragung wird mittels dezentralem „ledger“ (dt. Hauptbuch) System gewährleistet. Dies hat zum Vorteil, dass eine jede Transaktion ohne Einfluss von Unternehmen oder Regierungsstellen durchgeführt werden kann. Die Durchführung der Authentifizierung der Transaktionen erfolgt mittels „public keys“ (enthalten in der wallet) und „private keys“ (Authentifizierung des Nutzers). Anschließend müssen die Informationen der Mehrheit der Teilnehmer des Blockchain Netzwerkes (min. 51%) angenommen werden. Diese Transaktionswerte werden anschließend in den einzelnen Blockchain-Blöcken gespeichert. Daraus resultierend ist eine durchgängige Nachvollziehbarkeit bzw. Verbindlichkeit sowie Transparenz gegeben (vgl. Agrawal, & Gupta 2021, S 4f).

Eine Blockchain ist eine Datenstruktur deren wesentlichsten Eigenschaften wie folgt gegliedert werden kann:

- Datenredundanz
- die Verifikation von Transaktionen vor der Validierung durchführt
- Informationen in Blöcken speichert

Diese Blöcke werden mithilfe von implementierten Algorithmen stetig auf Manipulation geprüft. Die Verschlüsselung der Informationen mittels „public keys“ und „private keys“ schafft zusätzlich Sicherheit. Blockchain-orientierte Software kann somit einen erheblichen Beitrag zur Gewährleistung der Verbindlichkeit, Transparenz und Sicherheit vor Datenmanipulation leisten (vgl. Raj 2021, S.181).

Ein beispielhaftes realisiertes Projekt basiert auf ein verkürztes Blockchain-Verfahren. Es führt eine Sonderform eines Blockchain-Ringes mit einem Hauptbuch ein, in welchem alle Automationsstationen und der dazugehörigen Daten digital abgebildet werden. Die Block-Daten können aus dem Automationsprogramm, den Netzwerkparametern und ähnlichem, der einzelnen Stationen bestehen. Dabei ist sicherzustellen, dass es sich um statische Datenblöcke handelt. Jedes Automationsgerät bildet mit ihren Daten einen Block der Blockchain. Im Inbetriebsetzungszyklus wird von einer jeden Unterstation ein digitaler Zwilling in die zentrale verschlüsselte Datenbank gesichert und mit „private keys“ versehen. Die Verifikation findet zwischen den einzelnen Teilnehmern des Blockchain Netzwerkes statt. Das

heißt, dass ein jeder Hash-Code von dem vorherigen Automationsgerät überprüft werden muss. Nachdem die ganze Kette durchlaufen ist, wird diese mit dem Hauptbuch verglichen (validiert). Stimmen die Ergebnisse überein konnte keine Datenmanipulation festgestellt werden. Falls dies nicht der Fall sein sollte, zerfällt die Blockchain und identifiziert das manipulierte Gerät. Anschließend wird dieses isoliert und kann mittels „self-healing“-Algorithmus in einen korrekten Zustand gebracht werden. Außerdem wird zeitgleich eine Alarmierung abgesetzt. Eine funktionierende Kette (Abb. 5) sowie eine Detektion einer Manipulation (Abb. 6) kann den nachfolgenden Darstellung entnommen werden.

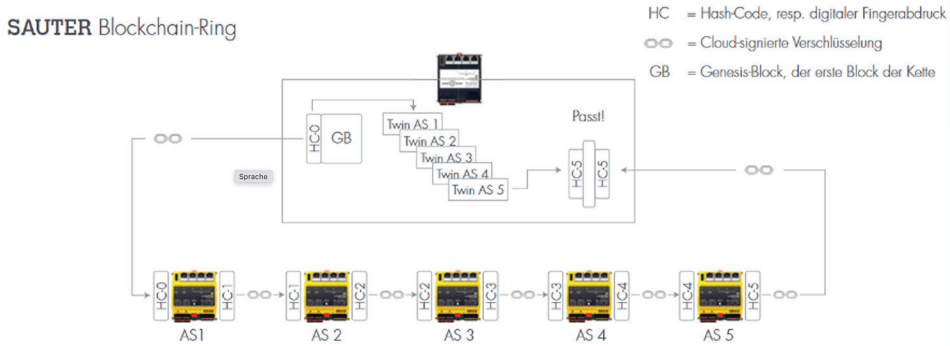


Abb. 5: Blockchain Beispiel ohne Alarmierung

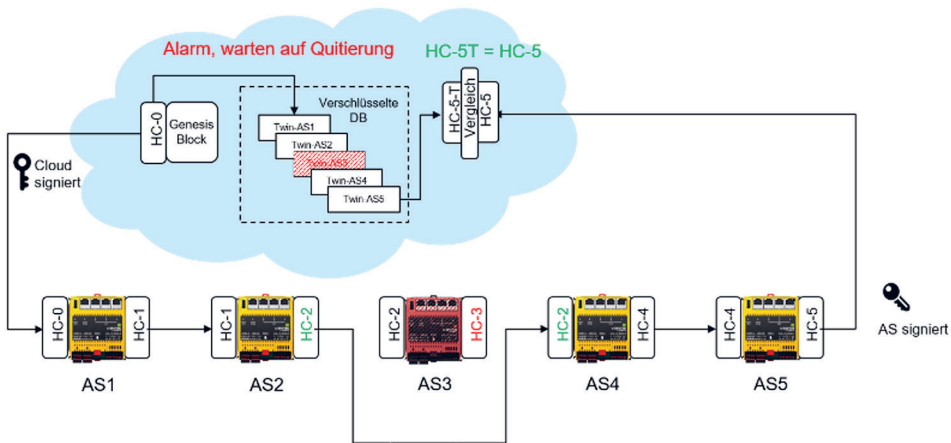


Abb. 6: Blockchain Beispiel Fehlerfall

Abschließend bleibt somit festzuhalten, dass die Integrität bei einer jeden Datenkommunikation ausgewertet und validiert wird. Bei Manipulation oder Eingriff durch Dritte fällt die Blockchain zusammen und ein Alarm wird abgesetzt. Optional könnte anhand der gespeicherten Daten in dem zentralen verschlüsselten Hauptbuch ein „self-healing“-Algorithmus ausgeführt werden, um den Ursprungszustand wieder herstellen zu können. Dadurch kann die Verbindlichkeit schlussendlich auch gewährleistet werden.

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das Themengebiet IT-Security wird zunehmend an Bedeutung in der technischen Gebäudeausrüstung gewinnen. Die Bedrohungspotenziale nehmen konstant zu, während hingegen die Eingriffe in reale Prozesse immer invasiver werden. So könnte z.B. bei einem produzierenden Betrieb die Kälteanlage durch unautorisierte Zugriffe abgeschaltet werden und eine ganze Produktionscharge beeinträchtigt werden. Durch den erhöhten Grad der Automatisierung in den heutigen Arbeitsprozessen müssen diese auch dementsprechend geschützt werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt primär darauf die Individualität der einhergehenden Lösung abbilden zu können. Schwachstellen eines Systems müssen identifiziert werden und können dann mit den vorher erwähnten Mechanismen (z.B. Verschlüsselung, Blockchain, hardwareseitiger Trennung von Systemen) korrigiert werden. Jeder der präsentierten Lösungsansätze besitzt Vor- und Nachteile. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass die Implementierung dieser Lösungsansätze anhand von Lasten- und Pflichtenheften definiert und dokumentiert werden muss. Außerdem führt eine Erhöhung der IT-Sicherheit automatisch zu einem Verlust der Flexibilität, da die Anforderungen an das System einen statisch überprüfbareren Zustand benötigen.

LITERATUR

- Agrawal R. & Gupta N. (2021) Transforming Cybersecurity Solutions using Block-chain. Singapore: Springer SingaporeText.
- ASHRAE Special Publications (2019). ANSI/ASHRAE Addendum bj to AN-SI/ASHRAE Standard 135-2016. ANSI/ASHRAE Addendum bj to AN-SI/ASHRAE Standard 135-2016. Online verfügbar unter <http://www.bacnet.org/Addenda/Add-135-2016bj.pdf> (abgerufen am 15.09.2021).
- Baumgarth S., Bollin E., Büchel M., Fromm B., Karbach A., Otto D., Paerschke H., Ritzenhoff P., Schernus G.-P., Sokollik F., Tiersch F. & Treusch W. (2004) Digitale Gebäudeautomation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Berling B., Heinrich B (Hrsg), Thrun W. & Vogt W. (2009) Kaspers/Küfner Messen-Steuern-Regeln – Elemente der Automatisierungstechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag
- Granzer W., Kastner W., Neugschwadntner G. & Praus F. (2006) Security in Net-worked Building Automation Systems. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center.
- Granzer W., Praus F. & Kastner W (2010) Security in Building Automation Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (11), 3622–3630. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2036033>.
- Kappes, M. (2007) Netzwerk- und Datensicherheit. Wiesbaden: Teubner.
- Kizza, J. M. (2020) Guide to Computer Network Security. Cham: Springer International Publishing.
- Lachance, L. (2021) IT vs. OT für das Industrielle Internet. Online verfügbar unter <https://www.global-sign.com/de-de/blog/it-vs-ot-im-industriellen-internet> (abgerufen am 15.09.2021).
- Osborne M. & Fisher D. (2018) BACnet Secure Connect (BACnet/SC) White Paper. Published by ASHRAE, Online verfügbar unter https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/BACnet-SC-Whitepaper-v10_Final_20180710.pdf (abgerufen am 15.09.2021).
- Raj, P. (2021) Blockchain Technology and Applications. Milton: Auerbach Publishers Incorporated.
- Wang, S. (2010) Intelligent buildings and building automation. London/New York: Spon Press.

KONTAKTDATEN:

Sauter Mess- und Regeltechnik GmbH
 z.Hdn. Hrn. Alexander Waringer
 Niedermoserstraße 11
 A-1220 Wien
 Email: sauter.wien@at.sauter-bc.com

Visible Light Positioning im smarten Gebäude – Lösungsansätze und Herausforderungen

A. P. Weiss, Ch. Fragner, F. P. Wenzl

*Institut für Oberflächentechnologien und Photonik – Smart Connected Lighting
JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mBH, Pinkafeld, Österreich*

ABSTRACT: Due to the fact that the Global Positioning System (GPS) is not reliable indoors due to signal attenuation by the building itself (walls, concrete ceilings, etc.) and multipath propagations, many technologies and approaches have been developed to implement alternative Indoor Positioning Systems (IPS). Amongst the different technologies and approaches, such as camera-based IPS or systems that rely on signals in the radio frequency spectrum (e.g. WiFi), Light-based IPS, also known as Visible Light Positioning (VLP) using the visible light spectrum (~400 nm to 800 nm) for position determination have evolved to become an ideal candidate for indoor positioning. In general, VLP systems have the advantage that position determination can be performed as an additional functionality besides the mandatory room illumination. Apart from this advantage, that is common to all the different solution approaches in VLP, the different categories of VLP systems as well as the used methods for position estimation play an important role in determining the complexity of the system as well as in the necessary installation effort and the achievable accuracy of position estimation. Especially the positioning accuracies to be achieved as well as the necessary installation effort in the building vary strongly depending on the different solution approaches. As a result, the positioning accuracy of VLP systems must always be considered in relation to the higher-level function to be implemented. For example, fall detection by means of VLP places the highest demands on positioning accuracy, since the position must be determined continuously in 3D, while the realization of the function of occupancy detection of a room usually only requires the information in which room the user is located in. Our contribution shows the possibilities and approaches for the implementation of light-based position detection systems. By elaborating the different approaches we show which installation effort in the building is necessary for the realization. Based on the state of the art we will clearly present the advantages as well as the current limitations of the different approaches presenting also some of our research results on these topics. This work should enable the reader to understand the basic categories and concepts of VLP systems, their specific advantages and disadvantages and provide an insight into the expectable installation effort in the building.

1. EINLEITUNG

Aufgrund der Tatsache, dass das *Global Positioning System* (GPS) in Innenräumen aufgrund der Signaldämpfung durch das Gebäude selbst (Wände, Betondecken usw.) und der Mehrwegeausbreitung nicht zuverlässig ist, wurden viele Technologien und Ansätze entwickelt, um alternative Innenraum-Positionierungssysteme (IPS) zu implementieren. Unter den verschiedenen Technologien und Ansätzen, wie z. B. Systeme, die sich auf Signale im Funkfrequenzspektrum (z. B. WiFi) stützen (Caso et al. 2020), haben sich lichtbasierte IPS, auch bekannt als *Visible Light Positioning* (VLP), die das sichtbare Lichtspektrum (~400 nm bis 800 nm) zur Positionsbestimmung nutzen, zu einem idealen IPS Kandidaten entwickelt. Im Bereich der Positionierungsgenauigkeit ist diese Technologie führend mit bis zu einigen wenigen Zentimeter Fehler in der Positionsbestimmung bei gleichzeitig minimalen Kosten, Ressourcenverbrauch und minimalen Datenschutzbedenken. Vergleichbare Genauigkeiten in der Po-

sitionsbestimmung werden nur von *Sound* basierten Systemen erreicht (Mendoza-Silva et al. 2019), wobei diese Technologie den Nachteil besitzt, dass Mikrofone oder Schallquellen in der Infrastruktur verteilt werden müssen. Das wohl grundlegendste Problem ist, dass, abhängig von Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sich die Schallgeschwindigkeit teilweise signifikant ändert, weshalb externe Sensorik eingesetzt werden muss um diese Effekte zu kompensieren. Außerdem ist der Einsatz von Mikrofonen auch mit Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes behaftet.

Der wohl größte Vorteil von VLP besteht darin, dass die obligatorische Raumbeleuchtung erhalten bleibt und die Positionsbestimmung als zusätzliche Funktion ausgeführt werden kann. Vergleichbar dazu sind nur WiFi basierte IPS in der Lage, bereits vorhandene Infrastruktur zur Positionsbestimmung zu nutzen. Die erzielbaren Genauigkeiten in der Positionsbestimmung werden bis ~40 cm (Kotaru et al. 2015) mittlere Abweichung vom tatsächlichen Standort beschrieben. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass teilweise zusätzlich Datenpakete versendet werden müssen. Dies wiederum verringert die verfügbare Kommunikationsbandbreite für die „normale“ WiFi Kommunikation. Dieser Effekt, dass die Hauptfunktionalität durch die zusätzliche Positionsbestimmung beeinflusst wird, ist in VLP Systemen nicht gegeben.

Hinsichtlich des notwendigen Aufwands für Installation und Betrieb im Gebäude ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede bei der Umsetzung einzelner Ausführungen des VLP. Dieser Aufwand stellt einen maßgeblichen Faktor dar, der die weitere Marktdurchdringung von VLP wesentlich beeinflusst. Nichtsdestotrotz stellt VLP eine innovative Möglichkeit zur Interaktion zwischen Mensch und Gebäude dar.

Dieser Beitrag gliedert sich in folgende Kapitel: Kapitel 2 beschreibt die generelle Technologie des VLP, beginnend bei der Beschreibung der grundlegenden Ausführungsformen und eingesetzten Methoden. Kapitel 3 geht auf die Anforderungen in Bezug auf das Gebäude der einzelnen Subkategorien von VLP Systemen ein. Kapitel 4 zeigt Möglichkeiten auf wie die Funktion des VLP mit minimalen Aufwand in Bezug auf das Gebäude und Installation realisiert werden kann. Kapitel 5 fasst diesen Beitrag zusammen und liefert einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2. VISIBLE LIGHT POSITIONING

In seiner generellsten Beschreibung ist *Visible Light Positioning eine Technologie, die anhand von empfangenen Lichtintensitäten und/oder der spektralen Zusammensetzung des empfangenen Lichts an einem oder mehreren photosensitiven Element(en) die Position eines Objekts oder einer Person im Raum bestimmen kann. Die grundlegenden Ausführungsformen können in zwei Hauptkategorien, nämlich Device-based und Device-free, unterteilt werden* (Mendoza-Silva et al. 2019).

Unter *Device-based* Systemen versteht man die Ausführungsform, dass die Empfangseinheit bestückt mit einem oder mehreren photosensitiven Element(en), sowie etwaige andere notwendige elektronischen Schaltungen (z.B.: Verstärkerschaltungen) und eine Verarbeitungseinheit (z.B. Mikrocontroller) direkt vom Benutzer (oder Objekt) gehalten wird oder am Benutzer befestigt ist. Grundlegend wird dabei das auf dem photosensitiven Element einfallende Licht ausgewertet und mittels unterschiedlicher, später beschriebener Methoden, wie z.B. Triangulierung (Almadani et al. 2019) oder Fingerprinting (Chen et al. 2020) die Position des Empfängers bestimmt. Das bedeutet, dass in der *Device-based* Ausführung der Empfänger bzw. Benutzer seine eigene Position im Raum bestimmt. Je nach eingesetzter Methode kann dabei das Licht, das vom Beleuchtungskörper (üblicherweise LED basiert) ausgesendet wird, moduliert oder unmoduliert sein. Im Falle einer Modulation liegt die Modulationsfrequenz jedoch unter der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Auges und wird deshalb nicht als Flimmern wahrgenommen.

In *Device-free* Systemen sind sowohl die Lichtquelle(n) wie auch die empfangenden photosensitiven Elemente in der Infrastruktur verbaut. Dieser Ansatz beruht darauf, dass die Reflexionen oder Lichtveränderungen (z.B. Schattenwurf) verursacht durch den Benutzer oder ein Objekt zur Positionsbestimmung ausgewertet werden. In den meisten Fällen werden die Lichtpunkte üblicherweise im

Deckenbereich angebracht während anhand der Position der empfangenden Elemente eine weitere Unterteilung der *Device-free* Systeme, in *Line-of-Sight* (LoS) oder *non Line-of-Sight* (nLoS), vorgenommen werden kann. LoS Systeme beruhen darauf, dass die empfangenden Elemente nicht im Nahbereich der Lichtquelle angebracht werden, sondern zum Beispiel in horizontaler Ausrichtung an den Wänden (Faulkner et al. 2020) oder im Boden (Zhang et al. 2018). Aufgrund der durch das Objekt oder den Menschen hervorgerufene Änderungen der einfallenden Lichtintensität und/oder des einfallenden Lichtspektrums (Schattenwurf oder Unterbrechen der *Line-of-Sight* zwischen der (den) Lichtquelle(n) und den Empfängern), wird die Position des Objekts oder des Menschen bestimmt. Somit bestimmt in der Kategorie der *Device-free* Systeme vorrangig das System im Raum die Position der anwesenden Objekte oder Personen, während der Benutzer (Objekt) selbst seine Position nicht direkt kennt. In der nLoS Ausführung von *Device-free* Systemen wird nur reflektiertes Licht von den im Nahbereich der Lichtquelle(n), üblicherweise ebenfalls im Deckenbereich, angebrachten empfangenden Elementen ausgewertet (Nguyen 2018). Diese nLoS *Device-free* Systeme werden auch als sogenanntes Backscattered VLP (B-VLP) bezeichnet. Der Vorteil des B-VLP ist es, dass die empfangenden Elemente im Beleuchtungskörper integriert werden können und somit der Installationsaufwand wesentlich geringer ausfällt als bei LoS *Device-free* Systemen.

Im Vergleich zwischen *Device-based* VLP Systemen und *Device-free* VLP Systemen bleibt festzuhalten, dass, obwohl die Forschungsaktivitäten im Bereich der *Device-free* Systeme in den letzten Jahren stark an Dynamik gewonnen haben, diese Systeme eine relative neue Ausprägungsform von VLP Systemen darstellen (Singh 2020). In den weiteren Ausführungen dieses Beitrags wird deshalb vorrangig auf *Device-based* VLP Systeme eingegangen, da diese Systeme bezüglich einer kommerziellen Verwertung weitaus fortgeschrittener sind.

METHODEN DER DEVICE-BASED VLP SYSTEME

Die eingesetzten Methoden zur Positionsbestimmung bei *Device-based* VLP Systemen gliedern sich in drei verschiedene Ansätze, wobei die eingesetzten Methoden sich nicht wesentlich von den Methoden anderer IPS Systemen (z.B. WiFi-basiert) unterscheiden.

Geometriebasierte Ansätze sind ein Sammelbegriff für Methoden, wie zum Beispiel Triangulation oder Trilateration, die die empfangenen Signaleigenschaften mehrerer Lichtquellen z.B. empfangene Signalstärke (RSS) oder *Angle-of-Arrival* (AoA) nutzen um in Bezug auf die bekannten absoluten Positionen der Lichtquellen die Position zu berechnen. Einer der wesentlichen Aspekte dieses Ansatzes ist es, dass die Positionen der Lichtquellen, sowie deren Lichtabstrahlcharakteristik möglichst präzise vorliegen müssen, um die in der Literatur beschriebenen Genauigkeiten erreichen zu können.

Der zweite Ansatz, die sogenannte *Proximity* basierte Positionsbestimmung, beruht darauf, dass die jeweiligen Lichtquellen eine eindeutige ID besitzen, die mittels Intensitätsmodulation des ausgesendeten Lichts an den Empfänger übertragen werden. Die Datenübertragung durch Modulation der Intensität einer Lichtquelle (üblicherweise LED basiert) wird unter dem Begriff *Visible Light Communication* (VLC) zusammengefasst. Für weitere Details zum umfangreichen Thema VLC sei hier auf Weiss et al. (2020) verwiesen. In der einfachsten Ausführung von *Proximity* basierten Systemen wird anhand der erkannten ID der Lichtquelle und deren bekannter Position, die Position des Empfängers ermittelt. Zur Steigerung der Positionierungsgenauigkeiten die mit diesen Systemen erreichbar sind werden zunehmend Ansätze realisiert, die die aus VLP gewonnenen Informationen mit Sensordaten von IMU Sensoren fusionieren (Liang 2020). Nichtsdestotrotz ist eine der Grundvoraussetzungen des *Proximity* basierten Ansatzes, dass die Lichtquelle(n) die Fähigkeit besitzen ihre eindeutige ID zu kommunizieren.

Im dritten Ansatz, dem sogenannten *Fingerprinting*, wird in einer sogenannten *Offline*-Phase, eine „Karte“, in Folge *Offline*-Map genannt, des Raums oder des Bereichs in dem die Position bestimmt werden soll, erstellt. Dabei wird an definierten Positionen das einfallende Licht auf dem Empfänger gemessen und dieser Position zugeordnet. In der *Online*-Phase, in der die aktuelle Position des Empfängers ermittelt wird, wird der aktuelle Messwert mit den gespeicherten Werten der *Offline*-Map verglichen und der Punkt mit der größten Übereinstimmung als Position des Empfängers

angesehen. Dieser Ansatz besitzt den Vorteil, dass weder die genauen Positionen der Lichtquellen bekannt sein müssen oder die Lichtquellen eine eindeutige ID kommunizieren müssen. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass die Erstellung der *Offline-Map* an genügend Positionen eine zeitaufwändige Tätigkeit darstellt und die Genauigkeit der Positionsbestimmung eben durch die Auflösung der *Offline-Map* begrenzt ist. Abhängig von der beschriebenen Genauigkeit der *Offline-Map* können damit Resultate mit einem mittleren Fehler in der Positionsbestimmung von 2,5 cm bis 5,25 cm erreicht werden (Chen et al. 2020).

Wie bereits im Zuge der Ausführungen erwähnt, werden zur weiteren Steigerung der Positionierungsgenauigkeiten die Ansätze zur Positionsbestimmung mittels sichtbarem Licht mit anderen Sensortechnologien fusioniert (Liang & Liu 2020). Nichtsdestotrotz müssen auch solche hybriden Systeme die Grundanforderungen der eingesetzten VLP Methode erfüllen, z.B. dass die Position der Lichtquelle bekannt ist, weshalb hier nicht näher auf diese hybriden Systeme eingegangen wird. Im nächsten Abschnitt, Kapitel 3, werden die beschriebenen Methoden in Hinsicht auf ihre Anforderungen an das Gebäude beleuchtet.

3. VLP ANFORDERUNGEN AN DAS GEBÄUDE

Die beschriebenen Ausführungsformen von VLP Systemen stellen teils sehr unterschiedliche Anforderungen an das Gebäude, wobei bei diesen Betrachtungen auch zwischen Neubauten bzw. in Plan befindlichen Gebäuden und Bestandsgebäuden unterschieden werden muss.

Geometrie basierte Methoden haben die Grundvoraussetzung, dass die Positionen und Abstrahlcharakteristika der Lichtquellen präzise bekannt sein müssen, sowie dass eine Mindestanzahl (üblicherweise 3) von Lichtquellen vorhanden sein muss. Im Bereich des Neubaus kann der Aufwand zur Realisierung als moderat eingestuft werden, da die Positionen der Lichtquellen aus den digitalen Bauplänen übernommen werden können. In Bestandsgebäuden, vor allem in dem Fall das keine genauen Baupläne vorhanden sind, ergibt sich ein sehr hoher Aufwand, da die Positionen der Lichtquellen aufwändig ermittelt werden müssen. Generell sind bei dieser Methode des VLP Punktlichtquellen zu bevorzugen, da großflächige Beleuchtungskörper aufgrund ihrer breiten und schwer charakterisierbaren Abstrahlcharakteristik einen großen Nachteil darstellen. Dieser Umstand kann jedoch in Neubauten in der Lichtplanung berücksichtigt werden.

Proximity basierte Methoden, mit ihrer Grundvoraussetzung, dass der Beleuchtungskörper seine eindeutige ID übermitteln muss, sind in ihrem Aufwand für Neubauten als moderat und für Bestandsgebäude als hoch zu bewerten. Vor allem der Umstand, dass bereits erste kommerziell verfügbare VLC fähige Beleuchtungskörper zur Verfügung stehen, ermöglicht eine einfachere Realisierung dieser VLP Methode. In Bezug auf Bestandsgebäude ergibt sich ein weitaus höherer Aufwand, da die bestehenden Beleuchtungskörper ersetzt werden müssen.

Bei der Realisierung des *Fingerprinting* ergeben sich in Bezug auf die vorhandene Beleuchtung per se keine gesonderten Anforderungen, jedoch muss für die Erstellung der notwendigen *Offline-Map* ein gewisser Zeitaufwand berücksichtigt werden.

Diese Betrachtungen zeigen, dass Geometrie basierte VLP System mitunter die höchsten Anforderungen stellen, jedoch gleichzeitig auch in der Positionierungsgenauigkeit führend sind. Deshalb ergibt sich die Notwendigkeit VLP Systeme immer in Bezug auf die zu realisierenden übergeordneten Funktionen zu betrachten. So stellt zum Beispiel die Sturzerkennung mittels VLP höchste Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit, da die Position kontinuierlich in 3D bestimmt werden muss, während für die Realisierung der Funktion der Belegungserkennung eines Raums meist nur die Information in welchem Raum sich der Benutzer befindet erforderlich ist.

Im nachfolgenden Kapitel 4, sollen anhand der Forschungsergebnisse Möglichkeiten aufgezeigt werden wie zum Beispiel der Raum in dem sich der Benutzer befindet ermittelt werden kann ohne der Notwendigkeit irgendwelche Änderungen an der bestehenden Lichtinfrastruktur vorzunehmen.

4. REALISIERUNGEN VON VLP

In Salem et al. (2020) konnte ein System vorgestellt werden, das mit Hilfe der Fusion eines IMU Sensors und einer einzelnen RGB-empfindlichen Photodiode erkennen kann, was, wo und wie lange ein Benutzer eine bestimmte Aktivität ausführt. Insgesamt liegen die erzielten Ergebnisse bei über 90 % korrekter Bestimmung des Raums, in dem sich der Benutzer befindet, der Aktivität die er ausführt, und der Richtung in deren die Aktivität durchgeführt wird. Die verwendete Methodik ist angelehnt an das *Proximity* Verfahren, jedoch wird der Raum nicht mittels einer versendeten ID ermittelt, sondern es werden anhand der vorherrschenden Beleuchtung des Raumes (z.B. Leuchtstoffröhren oder LED basiert) und der jeweils zuordenbaren eindeutigen Charakteristika (z.B.: spektrale Zusammensetzung) des ausgesendeten Lichts, die jeweiligen Räume erfolgreich unterschieden. Diese Ergebnisse zeigen, dass es auch ohne jedwede Veränderung der Beleuchtung möglich ist, mittels VLP die Position des Benutzers auf Raumebene zu bestimmen.

Aufbauend auf Salem et al. (2020) wurde in Salem et al. (2021) dieser Lösungsansatz weiterentwickelt, sodass die Position des Benutzers innerhalb gewisser Regionen im Raum bestimmt werden kann. Hierzu wurde der *Fingerprinting* Ansatz gewählt und die RSS der drei Kanäle der RGB Photodiode verwendet um die *Offline-Map* zu generieren. Durch Segmentierung der RSS Werte konnte erfolgreich gezeigt werden das ohne jegliche Änderung an der vorhandenen Beleuchtung die Position des Benutzers eindeutig gewissen Regionen im Raum zuordenbar ist.

In Lichtenegger et al. (2021) konnte gezeigt werden, dass eine Umsetzung des *Fingerprinting* Ansatzes auch ohne vorheriger, zeitaufwändiger experimenteller Erstellung der *Offline-Map* möglich ist. Hierzu wird unter der Annahme, dass mittels VLC die Beleuchtungskörper die Parameter des Raumes zur Verfügung stellen, die *Offline-Map* direkt im Empfänger errechnet. Mit Hilfe von *Ray-Tracing*-Simulationen konnten Genauigkeiten im Dezimeter- bis hin zum Zentimeterbereich in der Positionsbestimmung erreicht werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Navigation und *Tracking* oder Belegungserkennung sind nur zwei Beispiele für sogenannte *Location-based-Services* (LBS), die auf Basis von *Indoor Positioning* realisiert werden können. Die innovative Technologie der Positionsbestimmung mittels sichtbarem Licht, VLP, stellt dabei eine innovative Möglichkeit dar, die Positionsbestimmung als zusätzliche Funktion zur obligatorischen Raumbeleuchtung zu realisieren. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die grundlegenden Methoden des VLP mit den jeweiligen Anforderungen an das Gebäude geben. Die zunehmende Anzahl an kommerziell verfügbaren Produkten des verwandten Themengebiets der *Visible Light Communication* zeigt, dass die Evolution des Beleuchtungskörpers weg vom reinen Lichtpunkt hin zum essentiellen Bestandteil in der Bereitstellung von Funktionen, wie des *Indoor Positioning* kontinuierlich voranschreitet.

DANKSAGUNG

Das Projekt „SmartLight2Live“ wird von Bund und Land Burgenland sowie dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung im Rahmen des Programms Investitionen in Wachstum und Beschäftigung kofinanziert.

LITERATUR

Almadani Y., Ijaz M., Joseph W., Bastiaens S., Rajbhandari S., Adebisi B. & Plets D. (2019) A Novel 3D Visible Light Positioning Method Using Received Signal Strength for Industrial Applications. *Electronics*, 8, 11, pp. 1311.

- Caso G., De Nardis L., Lemic F., Handziski V., Wolisz A. & Benedetto M. D. (2020) ViFi: Virtual Fingerprinting WiFi-Based Indoor Positioning via Multi-Wall Multi-Floor Propagation Model. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 6, pp. 1478-1491
- Chen Y., Guan W., Li J. & Song H. (2020) Indoor Real-Time 3-D Visible Light Positioning System Using Fingerprinting and Extreme Learning Machine. *IEEE Access*, 8, pp. 13875-13886.
- Faulkner N., Alam F., Legg M. & Demidenko S. (2020) Watchers on the Wall: Passive Visible Light-Based Positioning and Tracking With Embedded Light-Sensors on the Wall. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69, 5, pp. 2522-2532.
- Kotaru M., Joshi K., Bharadia D. & Katti S. (2015) SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi. In: *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM '15)*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, pp. 269–282. DOI: [10.1145/2755959.2756000](https://doi.org/10.1145/2755959.2756000)
- Liang Q. & Liu M. (2020) A Tightly Coupled VLC-Inertial Localization System by EKF. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5, 2, pp. 3129-3136.
- Lichtenegger F., Leiner C., Sommer C., Weiss A. P., Wenzl F. P. & Salem Z. (2021) Simulation of fingerprinting based Visible Light Positioning without the need of prior map generation. To be published: *SPIE Digital Library, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*
- Mendoza-Silva G. M., Torres-Sospedra J. & Huerta J. (2019) A Meta-Review of Indoor Positioning Systems. *Sensors*, 19, pp. 4507.
- Nguyen V., Ibrahim M., Rupavatharam S., Jawahar M., Gruteser M. & Howard R. (2018) Eyclight: Light-and-Shadow-Based Occupancy Estimation and Room Activity Recognition. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications*. Honolulu, HI, USA: IEEE Communications Society, pp. 351-359
- Salem Z., Weiss A. P. & Wenzl F. P. (2020) A spatiotemporal framework for human indoor activity monitoring. In: *Proceedings of SPIE Future Sensing Technologies 2020*. Online: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 115251L.
- Salem Z., Weiss A. P. & Wenzl F. P. (2021) A low-complexity approach for visible light positioning and space-resolved human activity recognition. In: *Proceedings of SPIE Optical Metrology 2021*. Online: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 117850H.
- Singh J. & Raza U. (2020) Passive visible light positioning systems: an overview. In: *Proceedings of the Workshop on Light Up the IoT*. London, UK: Association for Computing Machinery, pp. 48–53.
- Weiss A. P., Wenzl F. P. & Kröpfel A. (2020) Die Leuchte im smarten Gebäude - Kommunikation - Sensor – Service Provider. *Technologie und Klimawandel (FH Burgenland Bd. 22)*, Österreich, Leykam
- Zhang S., Liu K., Ma Y., Huang X., Gong X. & Zhang Y. (2018) An Accurate Geometrical Multi-Target Device-Free Localization Method Using Light Sensors. *IEEE Sensors*, 18, 18, pp. 7619-7632.

KONTAKTDATEN:

Dr. Andreas Peter Weiss

Industriestrasse 6

7423 Pinkafeld

Email: andreas-peter.weiss@joanneum.at

Session 2b

Wärmepumpensysteme

Effizienzsteigerung von Wärmepumpen durch geschickte Speicher-Einbindung

Floss, Fürst / Hochschule Biberach / DE

Thermoelektrische Lüftungswärmepumpe – theoretisches und praktisches Potenzial

Hagenkamp, Blanke, Döring / FH Aachen – University of Applied Sciences / DE

Die ideale Wärmepumpe für Wohnungen

Vaillant geoTHERM 3 kW

Optimal für die Sanierung von
Mehrparteienhäusern - als nachhaltige,
dezentrale und kostensparende Lösung.

Mehr Informationen auf vaillant.at



Effizienzsteigerung von Wärmepumpen durch geschickte Speicher-Einbindung

A. Floss, D. Fürst

Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE) Hochschule Biberach, 88400 Biberach, Deutschland

ABSTRACT: The efficiency of a heat pump is largely dependent on the supply temperature generated. The lower the supply temperature can be kept in the application, the more efficient the heat pump will operate. However, the integration of storage tanks and a poorly adapted control concept can lead to efficiency losses, as these cause a reduction of the supply temperature from the heat pump to the consumer (Drop of Mean Temperature (DoMT)).

Previous research had suggested that a parallel 2-pipe connection of the storage tank is beneficial for efficient heat pump operation. However, observations at a field system have shown that, in practice, 2-pipe integration with several consumers operating at different temperature requirements can lead to difficulties resulting in a significant DoMT. The placement of the connection points of the consumers is crucial because it keeps mixing in the system low. In addition, hydraulic misflows in the system should be prevented by tightly closing armatures.

This paper describes the difficulties encountered at a field system and solutions with regard to the hydraulic and control concept are given.

1. EINLEITUNG

Im Zuge der Energiewende mit der notwendigen Umstellung von fossilen auf regenerative Energieträger ist der Wärmepumpe (WP) in Zukunft eine sehr große Bedeutung bei der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser zuzuschreiben.

Grundsätzlich zeichnen sich Wärmepumpen durch eine hohe Energieeffizienz aus, die in der Praxis jedoch selten vollumfänglich erreicht wird. Dabei haben Hydraulik und Regelungskonzept des Wärmepumpensystems (WPS) sowie die Einbindung von Pufferspeichern einen großen Einfluss auf die Effizienz, da hierdurch die Temperaturreduzierung im Vorlauf von der Wärmepumpe zum Verbraucher („Drop of Mean Temperature“ (DoMT)) beeinflusst wird.

Der vorliegende Beitrag beschreibt die an einer Feldanlage aufgetretenen Schwierigkeiten und zeigt Lösungsvorschläge bezüglich Hydraulik- und Regelungskonzept. Aufgrund der Praxisrelevanz handelt es sich hierbei um eine frühzeitige Veröffentlichung ohne abschließende Datenauswertung, sowohl an der Feld- als auch Laboranlage.

2. DROP OF MEAN TEMPERATURE (DOMT)

Die Effizienz einer Wärmepumpe ist maßgeblich von der erzeugten Vorlauftemperatur abhängig. Steigt die Vorlauftemperatur an der WP um 1 K an, führt dies zu einer Verschlechterung der Wärmepumpeneffizienz um ca. 3 % (Fink 2010). Damit stellt ein Abfall der Vorlauftemperatur zwischen Erzeuger und Verbraucher einen großen Faktor für Effizienzverluste in Wärmepumpensystemen dar. Denn um den Verbraucher mit der notwendigen Temperatur zu versorgen, muss die Wärmepumpe eine höhere Temperatur erzeugen, die diesen Temperaturabfall kompensiert.

Bei Messungen an realen Wärmepumpenanlagen mit Pufferspeicher hat Fink (2010) einen z.T. sehr großen Temperaturabfall von bis zu 10 K im Vorlauf von der Wärmepumpe zum Verbraucher

festgestellt. Diesen Temperaturabfall hat er dabei eindeutig auf Durchmischungen im Pufferspeicher und nicht auf Wärmeverluste an die Umgebung zurückgeführt. Dabei wirkt sich die Art der hydraulischen Einbindung des Pufferspeichers maßgeblich auf die Absenkung der Vorlauftemperatur zwischen Erzeuger und Verbraucher aus.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend haben Floß & Hofmann (2015) weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Den Temperaturabfall zwischen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe \bar{T}_{WP} und Vorlauftemperatur am Verbraucher \bar{T}_V , bezeichnen sie als „Drop of Mean Temperature“ (DoMT). Gleichung (1) definiert den DoMT.

$$\Delta\bar{T} = \bar{T}_{WP} - \bar{T}_V \quad (1)$$

Der DoMT wird dabei über einen Betriebszyklus betrachtet, der mit dem Einschalten der Wärmepumpe beginnt ($t_{an,1}$) und beim nächsten Einschaltzeitpunkt der Wärmepumpe ($t_{an,2}$) endet. Bei konstanten Massenströmen kann die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe (\bar{T}_{WP}) nach Gleichung (2) über die Verdichterlaufzeit gemittelt werden.

$$\bar{T}_{WP} = \frac{\int_{t_{an,1}}^{t_{aus,1}} T_{WP}(t) dt}{t_{aus,1} - t_{an,1}} \quad (2)$$

Die Verbraucher-Vorlauftemperatur (\bar{T}_V) wird nach Gleichung (3) über einen vollständigen Be- und Entladezyklus des Pufferspeichers gemittelt.

$$\bar{T}_V = \frac{\int_{t_{an,1}}^{t_{an,2}} T_V(t) dt}{t_{an,2} - t_{an,1}} \quad (3)$$

Im Falle variabler Massenströme müssen die Vorlauftemperaturen massenstromgewichtet werden.

Floß & Hofmann (2015) diskutieren den DoMT für verschiedene hydraulische Pufferspeicher-Einbindungen ausführlich.

3. PARALLELE EINBINDUNG DES PUFFERSPEICHERS

Grundsätzlich werden zwei Einbindungsarten von Pufferspeichern unterschieden: Die Einbindung des Pufferspeichers seriell in den Vor- oder Rücklauf zum Verbraucher oder parallel zum Verbraucher. Dieser Beitrag behandelt ausschließlich die Paralleleinbindung von Pufferspeichern.

Der Pufferspeicher wird dabei neben seiner Funktion als thermische Kapazität auch als hydraulische Weiche zwischen Erzeuger- und Verbraucherseite genutzt. Damit wird der üblichen Anforderung von Wärmepumpen an einen Mindestmassenstrom entsprochen. Ein weiterer Vorteil des parallel eingebundenen Pufferspeichers liegt in der Temperaturschichtung im Speicher. Bei einer geschichteten Entladung wird der Verbraucher theoretisch über den gesamten Entladezyklus mit einer konstant hohen Vorlauftemperatur aus dem Pufferspeicher versorgt. Dietrich (2008) weist darauf hin, dass durch eine geschichtete Entladung eine hohe effektive Speicherkapazität erzielt werden kann.

Wird der Pufferspeicher parallel zu Erzeuger und Verbraucher installiert, kann die Parallelschaltung, in Abhängigkeit der Art des Speicheranschlusses, in zwei grundlegende Ausführungen unterteilt werden: Die 4-Leiter-Einbindung und die 2-Leiter-Einbindung.

3.1 4-LEITER-EINBINDUNG

Bei der 4-Leiter-Einbindung gemäß Abb. 1 werden sowohl der Vor- und Rücklauf des Erzeugers (Wärmepumpe) als auch des Verbrauchers separat an den Pufferspeicher angeschlossen. Hierdurch wird der Pufferspeicher immer von den gesamten Massenströmen der Erzeuger- und Verbraucherseite durchflossen, was stets zu einer stärkeren Durchmischung im Speicher führt.

3.2 2-LEITER-EINBINDUNG

Bei der 2-Leiter-Einbindung hingegen, wie in Abb. 2 dargestellt, wird der Pufferspeicher nur über zwei Anschlussleitungen parallel zum gemeinsamen Vorlauf und Rücklauf zwischen Erzeuger und Verbraucher installiert. Diese Anschlussvariante führt dazu, dass nur der Differenzmassenstrom zwischen Erzeuger- und Verbraucherkreis über den Pufferspeicher strömt. Dadurch werden Durchmischungseffekte und Verwirbelungen im Speicher reduziert.

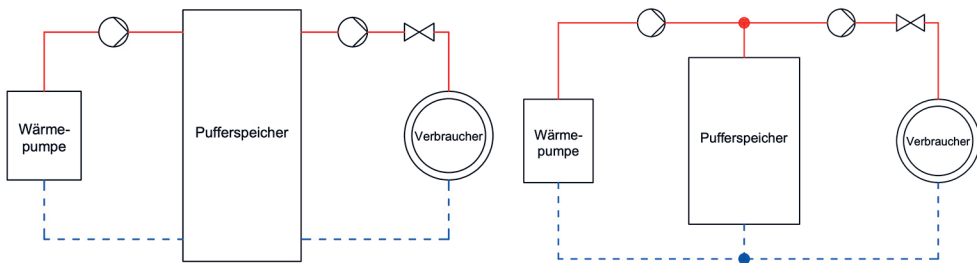


Abb. 1: Pufferspeicher in 4-Leiter-Einbindung

Abb. 2: Pufferspeicher in 2-Leiter-Einbindung

Die Feldversuche von Fink (2010) zeigen, dass der DoMT bei der 2-Leiter-Einbindung um bis zu 4 K niedriger ist, als bei der 4-Leiter-Einbindung, was in der Praxis einen um bis zu 12 % effizienteren Wärmepumpenbetrieb ermöglicht. Auch Schenk (2018) weist Durchmischungen im Pufferspeicher bei der 4-Leiter-Einbindung vor. Dennoch ist der 4-Leiter-Anschluss aktuell die überwiegende Einbindungsart.

Bei der Implementierung der 2-Leiter-Einbindung in der Praxis können jedoch Schwierigkeiten auftreten, die in diesem Beitrag aufgegriffen werden.

4. BEOBACHTUNGEN AN EINER FEL DANLAGE

Die Erkenntnisse der Abschlussarbeit setzte Fink (2010) später in seinem Privathaus in die Praxis um.

Ausgangspunkt des vorliegenden Beitrags waren Beobachtungen am bestehenden Wärmepumpenheizsystem seines Einfamilienhauses, bei dem der ursprüngliche 2-Leiter-Anschluss des Pufferspeichers bzw. Heizwasser-Speichers (HW-Speicher) zu Schwierigkeiten während des Anlagenbetriebs führte. Aufgrund bereits erfolgter Umbaumaßnahmen zur Behebung der Probleme, konnte der 2-Leiter-Anschluss messtechnisch nicht mehr erfasst und dokumentiert werden.

4.1 ANLAGENBESCHREIBUNG

Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau des Heizungssystems, samt hydraulischer Einbindung des Heizwasser-Speichers im 2-Leiter-Anschluss. Entgegen der Laboranlage verfügt die Realanlage über zwei Heizkreise (TWW-Speicher und Fußbodenheizkreis), die auf unterschiedlichen Temperaturniveaus arbeiten.

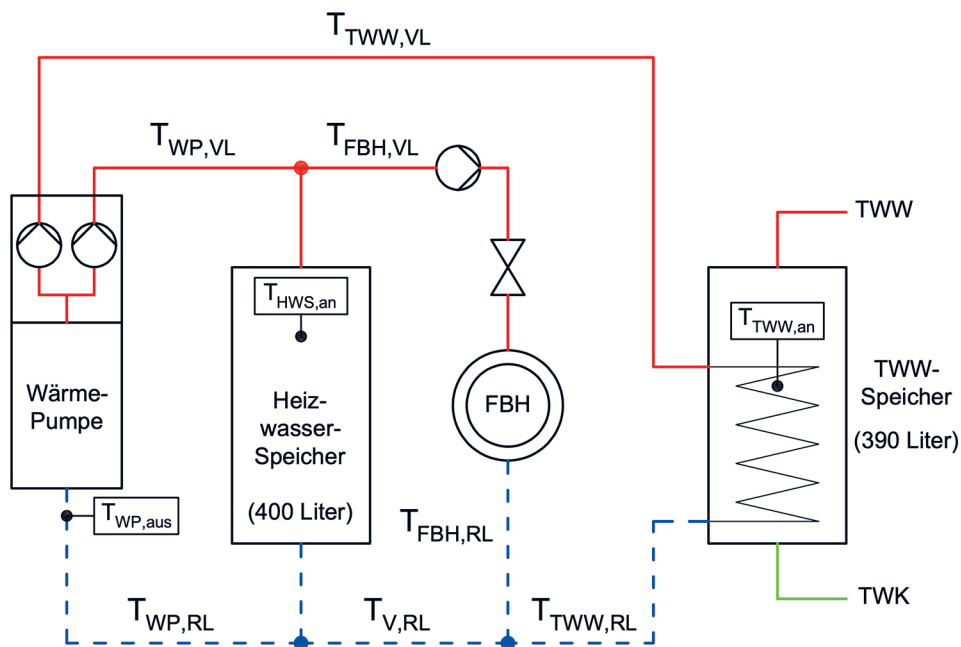


Abb. 3: Anlagenschema der Feldanlage Fink im ursprünglichen 2-Leiter-Anschluss

Da der Verdichter keine Möglichkeit der Leistungsmodulation besitzt, wird die Wärmepumpe taktend mit Ein-/Aus-Regelung betrieben. Die Drehzahl der werksseitig im Modul integrierten Umwälzpumpen lässt sich manuell variieren. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturanforderungen werden Heizwasser- bzw. Trinkwarmwasser-Speicher (TWW-Speicher) zeitversetzt beladen, wobei die Warmwasserbereitung Vorrang hat. Der Massenstrom im Fußbodenheizkreis (FBH-Kreis) wird über Thermostatventile geregelt.

Sowohl im Heizwasser-Speicher ($T_{HWS,an}$) als auch im TWW-Speicher ($T_{TWW,an}$) befindet sich im oberen Speicherbereich ein Temperaturfühler, der als Einschaltfühler zur Speicherbeladung dient. Als Abschaltfühler beider Speicher-Beladevorgänge wird der Temperaturfühler im Rücklauf zur Wärmepumpe ($T_{WP,aus}$) verwendet.

Diese gewählte hydraulische Einbindung und Regelstrategie von zwei Verbrauchern mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen führte während des Anlagenbetriebs zu mehreren neuartigen Problemen, die eine Anhebung des DoMT (entspricht Effizienzverschlechterung) zur Folge hatten und nachstehend beschrieben werden.

4.2 PROBLEMFALL1: MINDERVERSORGUNG UND VERMISCHUNG TWW-SPEICHER

Ein grundlegendes Problem der Durchmischung des TWW-Speichers und ggf. „Energieumschichtung“ vom TWW- in den HW-Speicher trat in der Heizperiode, beim Einschalten der Beladung des TWW-Speichers, auf.

In Abb. 4 wird diese Situation anhand eines Zahlenbeispiels verdeutlicht.

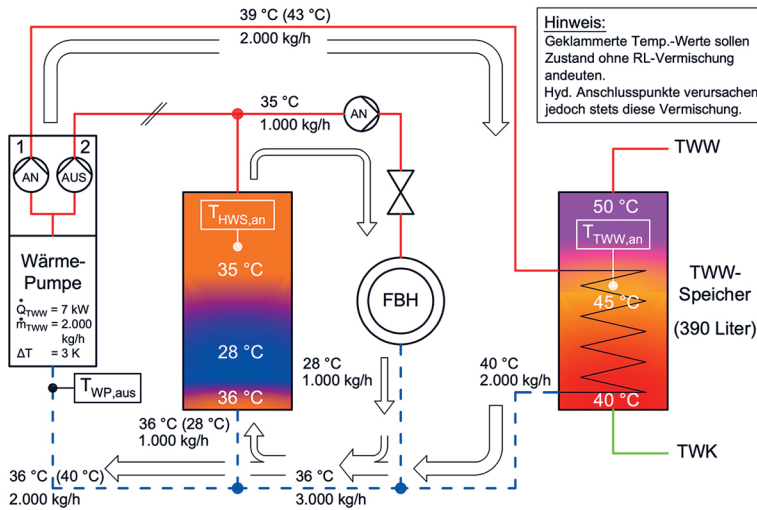


Abb. 4: Minderversorgung des TWW-Speichers bei gleichzeitiger HW-Speicher-Entladung (Zahlenbeispiel)

Bei Unterschreitung des Sollwertes im TWW-Speicher ($T_{TWW,an}$) von z.B. 45 °C schaltet Pumpe 1 ein und Pumpe 2 ab. Die Pumpe des FBH-Kreises läuft weiter. Dabei strömt Rücklaufwasser mit Temperaturen von z.T. über 40 °C vom TWW-Speicher zurück. Zeitgleich entnimmt der FBH-Kreis dem HW-Speicher 35-gradiges Wasser. Der auf 28 °C abgekühlte FBH-Rücklauf mischt sich nun mit dem 40-gradigen TWW-Rücklauf. Die daraus resultierende Mischtemperatur berechnet sich nach Gleichung (4).

$$\vartheta_m = \frac{\dot{m}_{RL,FBH} \cdot \vartheta_{RL,FBH} + \dot{m}_{RL,TWW} \cdot \vartheta_{RL,TWW}}{\dot{m}_{RL,FBH} + \dot{m}_{RL,TWW}} \quad (4)$$

Damit ergibt sich bei den angenommenen Massenströmen im Zahlenbeispiel aus Abb. 4 eine Mischtemperatur von 36 °C nach dem Mischpunkt.

Die Wärmepumpe mit einer Heizleistung von ca. 7 kW kann den konstanten Massenstrom zur TWW-Speicherbeladung (2.000 kg/h) lediglich um 3 K erwärmen und die Vorlauftemperatur an der Wärmepumpe kann nur auf 39 °C angehoben werden. Somit wird dem TWW-Speicher oben 39-gradiges Wasser zugeführt und unten 40-gradiges Wasser entnommen, was de facto zunächst zu einer Entladung des TWW-Speichers führt.

Analog dazu verursacht die Vermischung beider Verbraucher-Rückläufe einen ungewollten Anstieg der Rücklauftemperatur zum HW-Speicher auf 36 °C. Damit wird dem HW-Speicher oben 35-gradiges Wasser entnommen und unten 36-gradiges Wasser zugeführt, was zu einer durchmischten Beladung des HW-Speichers führt. Erst im zeitlichen Verlauf steigt dabei auch die Vorlauftemperatur zur FBH und die Rücklauftemperatur zur WP an, womit auch eine ausreichend hohe Vorlauftemperatur an der Wärmepumpe erzeugt werden kann, um den TWW-Speicher zu beladen.

4.3 PROBLEMFALL 2: ÜBERSTRÖMUNG WÄRMEPUMPE

In der Heizperiode wurde ein weiteres Problem beobachtet: Bei Betrieb des FBH-Kreises und ausgeschalteter Wärmepumpe induzierte die Umwälzpumpe der FBH eine Schleichmenge über die ausgeschaltete Wärmepumpe. Aufgrund der Überströmung wurde ein Temperaturabfall bzw. DoMT zwischen dem Vorlauf aus dem HW-Speicher und dem Vorlauf zur FBH von etwa 1 K bis 2 K beobachtet.

- In die Vorlaufleitung zwischen Wärmepumpe und Heizwasser-Speicher wurde ein dichtschließendes 2-Wege-Magnetventil eingebaut. Das Ventil ist stromlos geschlossen und öffnet nur, wenn die Wärmepumpenregelung diese Umwälzpumpe 2 einschaltet. Hiermit wird eine von der FBH-Umwälzpumpe induzierte Überströmung über die ausgeschaltete Wärmepumpe verhindert.

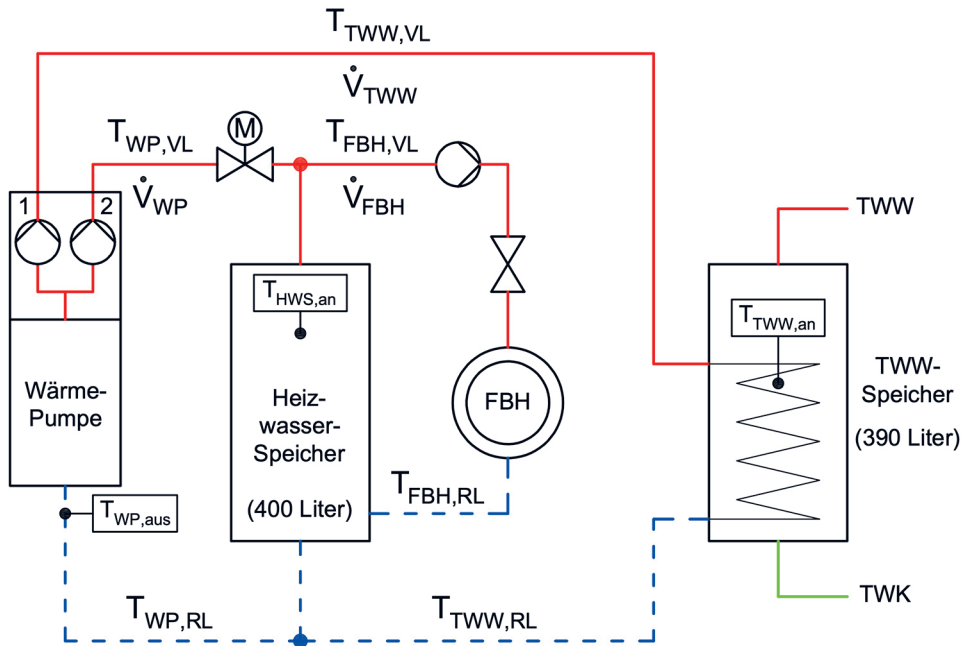


Abb. 6: Anlagenschema der Feldanlage Fink im aktuell bestehenden 3-Leiter-Anschluss

Die Umbaumaßnahmen konnten die festgestellten Probleme beheben, führten allerdings zu einer größeren Durchmischung im Heizwasser-Speicher.

DOMT-UNTERSUCHUNG 3-LEITER-FELDANLAGE

An der weiterhin bestehenden 3-Leiter-Feldanlage von Fink konnten im Gegensatz zur ursprünglichen 2-Leiter-Einbindung Messungen durchgeführt werden. Für die Untersuchungen wurden Temperaturen (Rohranlegefühler) und Volumenströme (Ultraschallmessung) an der Anlage messtechnisch erfasst. In Abb. 6 sind die Messpunkte eingetragen.

Bei den Messungen an der 3-Leiter-Anlage wurden die Vermutungen bezüglich schlechter Effizienz bestätigt: Es konnte ein DoMT im Bereich von 2,9 K bis 5,2 K ermittelt werden, wodurch sich Effizienzeinbußen von etwa 9 bis 16 % ergeben. Dieser DoMT-Bereich erscheint für einen parallel eingebundenen Heizwasser-Speicher recht hoch.

Abb. 7 zeigt exemplarisch einen Betriebszyklus für die DoMT-Betrachtung, beginnend ab dem Einschaltzeitpunkt der WP bis zum darauffolgenden, erneuten Einschaltzeitpunkt. Der DoMT für diesen Zyklus beträgt 3 K und kann der Differenz der entsprechenden Temperatur-Mittelwerte im Diagramm entnommen werden. Anhand Abb. 7 werden mögliche Ursachen für den hohen DoMT dieser Anlage erläutert.

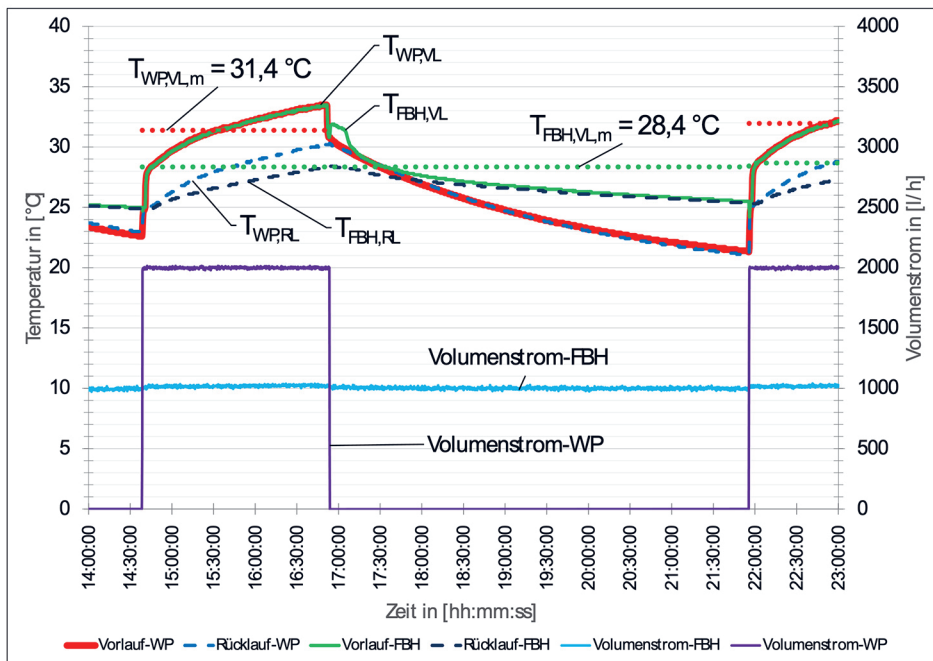


Abb. 7: Ausschnitt der grafischen Darstellung von Messwerten der 3-Leiter-Feldanlage

Ursachen für hohen DoMT der 3-Leiter-Anlage

Zwei Faktoren wirken sich nachteilig auf den DoMT und somit auf die Effizienz des Wärmepumpensystems aus:

- Separater Anschluss des FBH-Rücklaufs an den Heizwasser-Speicher
- Nachlaufzeit der Wärmepumpen-internen Umwälzpumpe 2 für die Heizkreisversorgung

Durch den Umbau des FBH-Rücklaufs direkt an den HW-Speicher (Umbau vom 2-Leiter zum 3-Leiter) konnte das Problem der Minderversorgung des TWW-Speichers behoben werden. Jedoch bewirkt der zusätzliche Speicheranschluss eine verstärkte Durchmischung im Heizwasser-Speicher. Eine Durchmischung im HW-Speicher verursacht Temperaturverluste im Bereich des Vorlaufs und damit verbunden eine Erhöhung des DoMT.

Nach Abschalten des Verdichters am Ende des Heizzyklus ist vom Wärmepumpen-Hersteller eine Nachlaufzeit der internen Umwälzpumpe 2 von 120 Sekunden voreingestellt, welche nur mit großem Aufwand durch den Hersteller geändert werden kann. Dadurch soll Restwärme aus dem Verflüssiger abgeführt und in den Heizkreis eingebracht werden.

In Abb. 7 ist ein starkes Abfallen der Vorlauftemperaturen nach dem Ende des Wärmepumpenbetriebs erkennbar. Aufgrund der langen Pumpennachlaufzeit bei hohem Volumenstrom (2.000 l/h) werden – je nach Volumenstrom im FBH-Kreis - bis zu 70 Liter kaltes Rücklaufwasser durch die WP in den oberen HW-Speicher-Bereich gefördert. Die Pumpennachlaufzeit wirkt sich hierbei negativ aus, da die Temperaturschichtung im Heizwasser-Speicher durch Eintrag von kälterem Wasser zerstört wird. Die Messungen haben gezeigt, dass zwischen Wärmepumpen-Vorlauf-temperatur (Abschaltpunkt Verdichter) und FBH-Vorlauf-temperatur (am Ende der Pumpennachlaufzeit) eine Temperaturdifferenz von ca. 0,5 K bis 1,5 K entsteht. Je höher der Volumenstrom über die Wärmepumpe bzw. Nachlaufzeit, desto größer der DoMT.

6. VARIATION DER 2-LEITER-EINBINDUNG

Die Untersuchungen der 2-Leiter und 3-Leiter-Einbindung zeigen, dass Vermischungen im System bereits durch die Platzierung der Verbraucher-Anschlusspunkte verursacht werden. In Abb. 8 sind mehrere Varianten der 2-Leiter-Einbindung dargestellt, deren Anschlusspunkte Durchmischungen in der Anlage verstärken oder reduzieren können. Dabei ist ein 2-Wege-Magnetventil im Vorlauf zwischen Wärmepumpe und HW-Speicher vorgesehen, welches nur öffnet, sobald Pumpe 2 im Betrieb ist, um eine heizseitige Fehlströmung bei ausgeschalteter WP zu verhindern.

Variante 1 in Abb. 8 stellt den ursprünglichen, problembehafteten 2-Leiter-Anschluss der Feldanlage dar, bei dem die Warmwasserbereitung während der Heizperiode zu Problemen führte (s. Abschnitt 4.2). Diese Probleme könnten regelungstechnisch dadurch gelöst werden, dass die FBH-Umwälzpumpe abgeschaltet wird, sobald Pumpe 1 den TWW-Speicher belädt. Die Warmwasserbereitung kann dann ohne Beeinträchtigung (Vermischungen) durch den FBH-Kreis erfolgen, wobei die FBH als träges Heizsystem problemlos kurzzeitig abgeschaltet werden kann.

Variante 2 löst die Probleme von Variante 1 baulich, indem der FBH-Rücklauf in Variante 2 stromaufwärts an die Rücklauffleitung zum HW-Speicher angeschlossen wird. Dadurch sind die Verbraucher-Rückläufe hydraulisch voneinander entkoppelt und beeinflussen sich bei zeitgleichem Betrieb nicht. Der 28 °C kalte FBH-Rücklauf strömt vollständig von unten in den HW-Speicher zurück, ohne sich dem TWW-Rücklauf beizumischen. Die Wärmepumpe kann den TWW-Speicher problemlos beladen. Diese Anschlussvariante ist zu bevorzugen, da Warmwasserbereitung und Gebäudebeheizung gleichzeitig und ohne gegenseitige Beeinflussung betrieben werden können.

Von Anschlussvariante 3 muss dringend abgeraten werden, da sich hierbei die Problematik von Variante 1 verschärft. Der FBH-Rücklauf wird bei Variante 3 stromaufwärts an die WP-Rücklauffleitung angebunden. Während der Warmwasserbereitung erreicht der warme, 40-gradige Rücklauf aus dem TWW-Speicher zuerst den Rücklaufanschluss des HW-Speichers und führt diesem von unten Energie zu. Ist der Massenstrom im FBH-Kreis geringer als der Massenstrom zur TWW-Speicherbeladung, so wird der FBH-Rücklauf vollständig in den Rücklauf zur Wärmepumpe beigemischt. Dadurch kühlt sich der Rücklauf zur Wärmepumpe so stark ab (z.B. 34 °C), dass die Wärmepumpe eine zu niedrige Vorlauftemperatur zum TWW-Speicher (hier 37 °C) erzeugt und diesen nicht ausreichend versorgen kann.

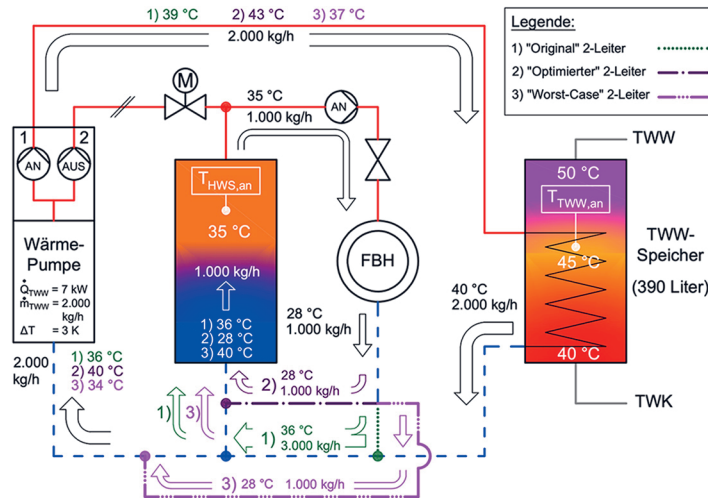


Abb. 8: Schematische Darstellung mehrerer Einbindungsvarianten im 2-Leiter (Zahlenbeispiel)

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die 2-Leiter-Einbindung des Pufferspeichers ist weiterhin vorteilhaft für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb. Bei mehreren Verbrauchern mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen ist jedoch die Platzierung der Anbindungspunkte entscheidend, um Durchmischungen im System gering zu halten. Zudem sollten Fehlströmungen in der Anlage durch dichtschießende Armaturen unterbunden werden, damit die Effizienzvorteile der 2-Leiter-Einbindung vollends genutzt werden. Andernfalls bestätigen die Untersuchungen einen relativ hohen DoMT von bis zu 5 K (3-Leiter-System).

LITERATUR

- Dietrich C. (2008) Effiziente Nutzung von Pufferspeichern – Messtechnische und theoretische Untersuchung konventioneller und innovativer Strategien der Puffereinbindung in Heizungssystemen. Diplomarbeit, Hochschule Biberach, Deutschland, 70 Seiten
- Fink S. (2010) Energieoptimierung von Wärmepumpenheizungsanlagen mit Pufferspeichern. Bachelorarbeit, Hochschule Biberach, Deutschland, 85 Seiten
- Floß A. & Hofmann S. (2015) Optimized integration of storage tanks in heat pump systems and adapted control strategies. *Energy and Buildings* (ISSN 0378-7788) 100, 10-15
- Schenk W. (2018) Optimierung der Jahresarbeitszahl bei bestehenden Wärmepumpenanlagen – Strategie und Beispiele. Referat beim Aktionskreis Energie e.V. Berlin, Deutschland

KONTAKTDATEN:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß
Hochschule Biberach
Karlstraße 11
88400 Biberach (Germany)
Email: floss@hochschule-bc.de

Thermoelektrische Lüftungswärmepumpe – theoretisches und praktisches Potenzial

M. Hagenkamp, T. Blanke, B. Döring

FH Aachen – University of Applied Sciences, Aachen, Deutschland

ABSTRACT: This study focuses on thermoelectric elements (TEE) as an alternative for room temperature control. TEEs are semiconductor devices that can heat and cool via a heat pump effect without direct noise emissions or refrigerants. For this purpose, a ventilation system based on TEE and aluminium heat sinks for exhaust air heat utilisation is being designed. An efficiency evaluation of the optimal operating mode is carried out for different numbers of TEEs, ambient temperatures and heating loads. The influence of an additional heat recovery unit on the system efficiency and an unevenly distributed heating demand are investigated. The results show that TEEs can provide heat with a coefficient of performance (COP) greater than one, especially at low heat demand and high outdoor temperatures. The efficiency increases with the number of elements in the system and is subject to positive economies of scale. The best COP is above six under optimal operating conditions. An additional heat recovery unit is advantageous for low ambient temperatures and systems with few TEEs. It enables COPs above one at ambient temperatures below 0 °C. This effect increases the efficiency by a maximum of 0.81 (from 1.90 to 2.71) at an ambient temperature of 5 K below room temperature and a heating demand of $\dot{Q}_h = 100 \text{ W}$, but is subject to negative scale effects. A first demonstration unit proves the principle function of the concept, but also reveals difficulties with the heat supply/dissipation and the control of the TEE. Based on this, a second demonstration device is created, which uses liquid cooling and heat pipes for heat transport and enables individual control of the TEE.

1. EINLEITUNG

Elektrisch betriebene Wärmepumpen sind die eindeutigen Gewinner im Ringen um Marktanteile bei den Wärmeerzeugern (Marktanteil Wärmeerzeuger im Neubau: 46 %) (Statistisches Bundesamt 2020). In Bestandsgebäuden ist die nachträgliche Wärmepumpeninstallation jedoch mit vergleichsweise großem Aufwand verbunden.

Zur Erschließung weiterer Marktsegmente und Energieeinsparpotenziale wird daher an der FH Aachen im Rahmen des EFRE-Forschungsprojekts „Flexible Module in Holzbauweise (FlexiMoH)“ (Förderkennzeichen: EFRE-0801167) eine auf Thermoelektrik basierende Mikrowärmepumpe konzeptioniert. Hintergrund ist, dass das Modulbauprinzip eine Entsprechung in weitgehend dezentraler, modularer Gebäudetechnik finden soll. Dabei werden thermoelektrische Elemente (TEE) genutzt, die bei elektrischem Stromfluss auf einer Seite Kälte und auf der anderen Seite Wärme abgeben. Vorteile gegenüber einer konventionellen Wärmepumpe sind unter anderem die weitgehende Vermeidung von umweltgefährdenden Kältemitteln, geringe Geräuschemissionen und Platzbedarf. Die Effizienz einer konventionellen Wärmepumpe kann durch ein einzelnes thermoelektrisches Element aktuell allerdings nicht erreicht werden.

In der bisherigen Literatur sind TEE bereits ausgiebig erforscht und charakterisiert worden und haben auch im Bereich der Gebäudetechnik schon einige Aufmerksamkeit erfahren. Eine ausführliche Analyse findet sich in Hagenkamp et al. (2021). Eine Abluftwärmepumpe mit zusätzlicher Wärmerückgewinnung ist bisher noch nicht untersucht worden. Mehrere TEE werden an der FH Aachen strömungstechnisch in Reihe in den Zu- bzw. Abluftkanal einer Lüftungsanlage integriert, um eine

Wärmepumpe abzubilden und gleichzeitig Wärme aus der Abluft zurückzugewinnen. Zuerst wird das theoretische Potenzial einer solchen Wärmepumpe als Abluft-Zuluft-Wärmepumpe mit und ohne zusätzliche Lüftungswärmerückgewinnung in einer Optimierung des stationären Betriebs ermittelt. Die theoretischen Erkenntnisse werden anschließend in einem Demonstrationsgerät experimentell überprüft und auf praktische Herausforderungen untersucht. Anhand der identifizierten kritischen Punkte wird ein angepasstes zweites Demonstrationsgerät konstruiert.

Ziel ist es, einzuschätzen, ob und in welchem Maß Thermoelektrik eine echte Alternative für Anwendungen sein kann, in denen konventionelle Wärmepumpen Wettbewerbsnachteile haben.

2. METHODE THEORETISCHE OPTIMIERUNG

2.1 PELTIEREFFEKT

Die Grundlage für die Funktion von TEE ist der Peltier-Effekt. Fließt ein Strom durch eine Kontaktstelle zwischen undotiertem Metall und Halbleitern, kommt es je nach Art des Halbleiters (p-Dotierung / n-Dotierung) zu einer Wärmeaufnahme oder einer Wärmeabgabe. Durch eine günstige Anordnung dieser Kontaktstellen kann eine Wärmeaufnahme und eine gleichzeitige Wärmeabgabe auf der anderen Seite der Metallkombination erreicht werden. Mehrere solcher Kombinationen (Thermopaare) können zu thermoelektrischen Elementen in Reihe geschaltet werden, wodurch sich der übertragene Wärmestrom erhöht. Wie in einer Wärmepumpe ist die auf der heißen Seite erzeugte Wärme auch auf die Übertragung von Wärme von der kalten Seite zurückzuführen. (Marrorana 1975)

2.2 SYSTEMAUSLEGUNG

Der höchste Wirkungsgrad eines TEE liegt bei geringer Auslastung und kleinstmöglicher Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite (European Thermodynamics 2021). Für einen gegebenen Heizbedarf wurden daher folgende Punkte zur Systemauslegung berücksichtigt:

- Lastreduktion durch Aufteilung des Wärmebedarfs auf mehrere TEE
- Nutzung der Abluftenergie zur Erwärmung der Zuluft
- minimale Anzahl an Wärmeübergängen zur Reduktion der Temperaturdifferenz
- geringe Temperaturdifferenz durch Luftführung im Gegenstromprinzip
- besonderes Augenmerk auf gute thermische Anbindung
- thermischer Parallelbetrieb anstatt thermische Stapel-/Reihenschaltung
- freie Wahl der optimalen Übertemperatur der Zuluft über Raumtemperatur

Diese Überlegungen führen zu einem System aus n thermisch parallel geschalteten TEE (s. Abb. 1). Die Zielfunktion des Optimierungsproblems ist die Minimierung des gesamten elektrischen Anlagenaufwands. Dieser minimale elektrische Aufwand wird für verschiedene Heizbedarfe, Außentemperaturen und Anzahlen von TEE im System ermittelt. Zusätzlich wird der Nutzen einer vorgeschalteten Wärmerückgewinnung (WRG) untersucht. (Hagenkamp et al. 2021)

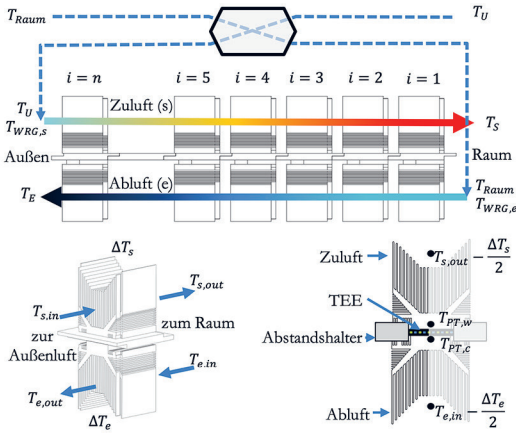


Abb. 1: schematische Darstellung der Anlage

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abb. 2 zeigt die berechneten Leistungszahlen (COP) für verschiedene Heizlasten und Anzahl von TEE im System bei Umgebungstemperaturen von -10 bis $19\text{ }^\circ\text{C}$. Die Ergebnisse in den oberen Diagrammen sind ausschließlich durch thermoelektrischen Betrieb erzielt. Die unteren Ergebnisse beinhalten eine zusätzliche WRG. Das System erreicht im besten Fall einen COP von mehr als sechs. Im ungünstigsten Fall fällt der COP bei niedrigen Umgebungstemperaturen und wenig TEE unter $0,75$. Bei einem Heizbedarf von 100 W reichen acht TEE aus, um bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur mehr Wärme zu liefern als eine elektrische Direktheizung. Es ist deutlich zu erkennen, dass der COP mit zunehmender Wärmelast sinkt und mit der Umgebungstemperatur steigt: Der durchschnittliche COP sinkt von $1,81$ bei einer Wärmelast von 100 W auf $1,29$ bei 1000 W und $1,14$ bei 2000 W . Gleichzeitig steigt der durchschnittliche COP von $0,94$ bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = -10\text{ }^\circ\text{C}$ auf $1,06$ bei $0\text{ }^\circ\text{C}$ bis $1,34$ bei $10\text{ }^\circ\text{C}$. Außerdem führt eine höhere Anzahl von TEE im System in allen Fällen zu einem Anstieg des COP.

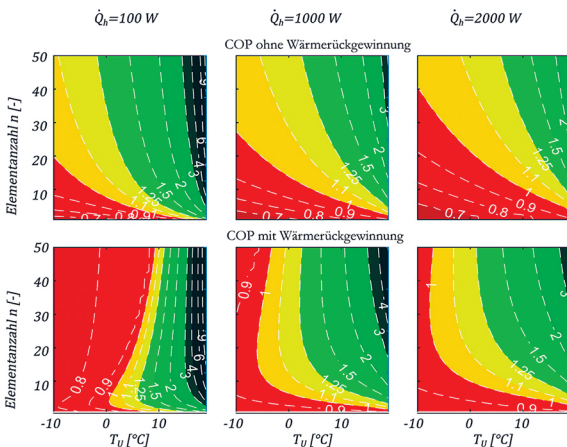


Abb. 2: Leistungszahl im optimalen Betrieb für verschiedene Heizbedarfe, Außentemperaturen und Anzahl an TEE im System

Diese Beobachtungen sind erwartungsgemäß, da sie entweder zu kleinerem individuellen Heizbedarf für ein einzelnes TEE führen oder die Gesamttemperaturdifferenz verringern. Die erforderliche Anzahl von TEE, um einen COP von eins oder mehr zu erreichen, steigt weniger als linear mit dem Heizbedarf, was darauf hindeutet, dass die Technologie positiven Skaleneffekten unterliegt. Dies gilt für die meisten Umgebungstemperaturen mit Ausnahme von Temperaturen, die sehr nahe an der Raumtemperatur liegen.

Eine WRG trägt besonders bei hohem Wärmebedarf in fast jeder Konfiguration zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades des Systems bei. In allen Untersuchungen nimmt der positive Effekt einer WRG mit sinkender Umgebungstemperatur ab. Diese Abnahme ist darauf zurückzuführen, dass eine vorgeschaltete WRG die abluftseitige Eintrittstemperatur senkt und die zuluftseitige Eintrittstemperatur erhöht. Dadurch steigt auch die mittlere Temperaturdifferenz über die TEE. Der größte Vorteil ergibt sich bei kleinen Temperaturunterschieden über die WRG. Der Effizienzverlust durch höhere thermoelektrische Temperaturdifferenzen ist bei kleinen thermischen Leistungen größer. Die Ursache für diesen Effizienzverlust ist, dass der Anteil des durch Wärmeleitung verlorenen Wärmestroms im Verhältnis zur Gesamtleistung größer ist. Bei einer großen Anzahl von TEE im System überwiegt der thermoelektrische Effizienzverlust aufgrund der höheren Temperaturdifferenz den Nutzen der WRG. Der Vergleich der verschiedenen Heizlasten zeigt, dass die Anzahl der TEE, ab der eine WRG nicht mehr sinnvoll ist, mit zunehmender Heizlast bzw. Anlagengröße weniger als linear zunimmt. Der COP eines Systems mit zehn TEE wird durch die WRG durchschnittlich um 0,2 verbessert, während er sich bei 20 TEEs nur um 0,16 und um 0,1 bei 30 TEE steigert. Daher ist der Einsatz einer WRG am sinnvollsten für kleine Systeme (d.h. wenige TEE).

4. EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG

4.1 ERSTES DEMONSTRATIONSGERÄT

Anhand der unter Punkt 3 beschriebenen theoretischen Ergebnisse ist ein erster Demonstrator konstruiert worden, um die Ergebnisse in der Praxis zu validieren (s. Abb. 4a). Acht der beschriebenen TEE sind in zwei Luftkanälen hintereinander angeordnet. Auf der warmen wie auf der kalten Seite sind mithilfe von Wärmeleitpaste Aluminiumkühlkörper angebracht. Die verbleibende Fläche zwischen den Luftkanälen wird mit 3D-Druckteilen und Dichtmasse geschlossen. Zur Aufprägung einer Luftströmung werden vier konventionelle PC-Lüfter eingesetzt. Je zwei TEE sind elektronisch über eine Reihenschaltung verbunden und diese TEE-Paare wiederum parallel an eine 24 V Spannungsversorgung angeschlossen. Mithilfe eines Mikrocontrollers wird ein PWM-Steuersignal erzeugt und auf die Versorgungsspannung auf moduliert. Der Mikrocontroller ist außerdem verantwortlich für je eine Strom- und drei Spannungsmessungen pro TEE-Paar. Mithilfe von NTC Widerständen wird am Mikrocontroller die Temperatur im Luftstrom und direkt am TEE sowohl auf warmer als auch auf kalter Seite gemessen. Die Ermittlung des Luftvolumenstroms erfolgt über zwei händische Flügelradanemometer.

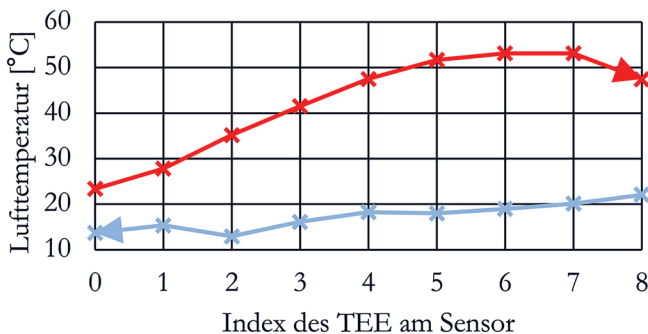


Abb. 3: Temperaturverlauf innerhalb des ersten Demonstrationsgerätes

Abb. 3 zeigt einen experimentell am Demonstrator gemessenen Temperaturverlauf.

Verlässliche Aussagen zum COP können anhand dessen nicht getroffen werden. Grund dafür sind folgende Herausforderungen, die eine verlässliche Validierung erschweren:

- Verbleibende Undichtigkeiten und der Drall der Strömung behindern trotz Strömungsgleichrichtung eine exakte Bilanzierung des Luftvolumenstroms.
- Leitungsverluste und Produktionstoleranzen bei NTCs und Strommesswiderständen führen aufgrund der kleinen individuellen Leistungen zu einer ungenauen Leistungserfassung.
- Die Performance eines TEE lässt sich nicht exakt mit einem anderen TEE reproduzieren. Je nach Qualität der thermischen Verbindung zu Kühlkörpern und Luftströmung stellt sich bei sonst gleichen Randbedingungen eine andere Kombination aus Strom und Spannung, ein anderes mittleres Temperaturniveau, und damit ein anderer Betriebspunkt ein.
- Insbesondere der thermische Anschluss der Warmseite ist kritisch. Kann über den Kühlkörper nicht genügend Wärme abgeführt werden, steigt die Temperatur und in ungünstigen Fällen führt die zusätzliche Wärmeleitung auch auf der kalten Seite zu einem Heizeffekt. Dieser Effekt ist auch am Demonstrator zu beobachten: In Abb. 3 ist zu erkennen, dass TEE 1 nicht zur Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebung beiträgt.

4.2 ÜBERARBEITETES DEMONSTRATIONSGERÄT

Um die Wärmeaufnahme und insbesondere die Wärmeabgabe zu verbessern, wird aktuell ein überarbeitetes Demonstrationsgerät erstellt (Abb. 4b). Ziel ist es, das theoretische Potenzial der Technik zu realisieren und eine Größenordnung für die erreichbare Effizienz zu ermitteln. Dazu werden folgende strukturelle Verbesserungen realisiert:



Abb. 4a: erstes Demonstrationsgerät mit 8 TEE und Aluminiumkühlkörpern



Abb. 4b: zweites Demonstrationsgerät 12 TEE, Wasserkühlung und mit Heatpipes

- Verbesserte Wärmeabfuhr durch separate Wasserkühlung für jedes TEE:
Die erzwungene Konvektion durch Wasserströmung und Rückkühlung des Wassers über größere Flächen verspricht eine signifikant höhere Leistungsabfuhr.
- Verbesserung der Wärmezufuhr durch Nutzung von Heat Pipes:
Heat Pipes (dt. „Wärmerohre“) basieren auf Verdampfung und Kondensation eines Fluids in geschlossenen Rohren. Die effektive Wärmeleitfähigkeit kann die Wärmeleitfähigkeit reinen Kupfers um mehrere Größenordnungen übersteigen.

- Investition in hochwertigere Komponenten:
Bei den erwähnten Wärmeübergabekomponenten, der Wärmeleitpaste, der Wärmedämmung und der Ansteuerung werden bewusst kostenintensivere Varianten gewählt, um kein Effizienzpotential ungenutzt zu lassen.

5. FAZIT

Mit einer ausreichend dimensionierten Anzahl an Peltierelementen und einer passend dimensionierten Anlage sind TEE theoretisch in der Lage, auch bei niedrigen Außentemperaturen Leistungszahlen über eins zu erreichen. Damit ist die vorgeschlagene Anlage effizienter als Stromdirektheizungen und bietet zudem den Vorteil einer zusätzlichen Kühl- und Belüftungsfunktion. In der Praxis konnte das Funktionsprinzip validiert, das theoretische Potential jedoch nicht ausgeschöpft werden. Um eine finale Einschätzung der Technologie im Anwendungsfall zu erlangen, sind daher weitere Effizienzsteigerungsmaßnahmen wie Wasserkühlung, Heatpipes, individuelle Regelung und bessere Wärmedämmung in einem zweiten Demonstrationsgerät integriert worden. Belastbare Ergebnisse liegen noch nicht vor und sind Ausgangspunkt der weiteren Forschungsarbeit.

LITERATUR

- European Thermodynamics (2021): Peltier Module, Datasheet APH-199-14-08-E, Abrufbar unter [https://www.europanthermodynamics.com/products/peltier-cooler/peltier-cooler/Thermoelectric-cooler-module-single-stage-165W %](https://www.europanthermodynamics.com/products/peltier-cooler/peltier-cooler/Thermoelectric-cooler-module-single-stage-165W%20)
- Hagenkamp, M., T. Blanke, B. Döring (2021): Thermoelectric building temperature control: a potential assessment. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2021.
- Martorana, R. T. (1975): Thermoelectric Temperature Control of Instrumentation -- A Sample Design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation IECI-22*, 1/1975, S. 69–75.
- Statistisches Bundesamt (2020): Baugenehmigungen, Baufertigstellungen. Lange Reihen bis 2019.

KONTAKTDATEN:

Markus Hagenkamp
Bayernallee 9
52064 Aachen
GERMANY
Email: hagenkamp@fh-aachen.de

Session 3b

Digitales Planen

Green BIM. Kriterien und Parameter, um Bauwerksbegrünung in das BIM-Modell zu bringen

Knoll, Renkin / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT
Kräftner / Kräftner Landschaftsarchitektur / AT
Dopheide / Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U. / AT
Murschetz / TU Graz / AT

Informationsintegration von BIM Daten mit BES und CFD Simulationen

Gursch, Schlager, Kern / Know-Center GmbH / AT
Pramhas / Thomas Lorenz ZT GmbH / AT
Knopper / IKK Engineering GmbH / AT
Brandl / TU Graz / AT
Gratzl / FH Salzburg / AT

Beitrag der BIM-Methodik zur CO₂-Reduktion – eine Potentialanalyse

Müller-Thiede, Königshofer / M.O.O.CON GmbH / AT
Deutschmann / Heid und Partner Rechtsanwälte GmbH / AT
Warzecha / Mensch und Maschine Austria GmbH / AT



Gebäudetechnik

Gebäudeautomation und elektrotechnische Anlagen effizient planen

Behalten Sie mit Hilfe einer durchgängigen Plattform den Überblick in der Planung und im Betrieb eines Gebäudes.

So erreichen Sie die Standardisierung und Automation von Prozessen und eine effizientere Arbeitsweise.

Mehr erfahren unter:

www.eplan.at/gebaeudetechnik

PROZESSBERATUNG

ENGINEERING-SOFTWARE

IMPLEMENTIERUNG

GLOBAL SUPPORT



FRIEDHELM LOH GROUP

Green BIM. Kriterien und Parameter, um Bauwerksbegrünung in das BIM-Modell zu bringen

B. Knoll, A. Renkin

Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH, Wien, Österreich

J. Kräftner

Kräftner Landschaftsarchitektur, Wien, Österreich

R. Dopheide

Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U., Wien, Österreich

J. Murschetz

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau an der Technischen Universität Graz, Österreich

ABSTRACT: Greening as a technical, however living system has to be clearly more emphasised as a part of the planning process and also included and documented throughout the whole process. This applies not only to architectural and façade design, but also to technical details, e.g., building services, water supply, static requirements, building physics, fire protection, accessibility, etc. Future vertical greenings should already be co-developed and incorporated into the building project within initial ideas and planning steps. This will require increased interdisciplinary cooperation between a wide range of disciplines such as landscape planning, landscape architecture, vegetation technology and landscape construction as well as architecture, building services, façade technology, building physics and statics. The involvement of specialist contractors as early as the planning phase begins is appreciated as well. Vertical greening should always be considered as a living system, hence paying attention to the interface human beings – technology – nature is of major importance! Planning and construction documentation from the beginning and a comprehensive documentation of the green care and maintenance in the ongoing operation are of great importance.

1. EINLEITUNG

Vertikalbegrünungen als technische, jedoch lebende Systeme müssen deutlich als Teil des Planungsprozesses hervorgehoben werden und in allen Planungsschritten miteinbezogen und dokumentiert werden. Dies gilt nicht nur für den landschaftsarchitektonischen Entwurf und die Fassadengestaltung, sondern bezieht sich auch auf technische Details zum Beispiel betreffend Haustechnik, statische Voraussetzungen und Reserven, Bauphysik, Brandschutz, Erreichbarkeit etc. Zukünftige Vertikalbegrünungen sollten schon mit den ersten Ideen und Planungsschritten von Bauvorhaben mitentwickelt werden. Dies erfordert in der Zukunft ein verstärktes interdisziplinäres Zusammenwirken unterschiedlichster Fachdisziplinen, wie Landschaftsplanung, Landschaftsarchitektur, Vegetationstechnik, Landschaftsbau und auch Architektur, Haustechnik, Bauphysik und Statik. Auch das Hinanziehen ausführender Fachfirmen in der Planungsphase ist zu begrüßen. Vertikalbegrünungen sind immer lebende Systeme! Daher ist die Schnittstelle Mensch – Technik – Natur enorm wichtig. Die planungs- und bautechnische Dokumentation von Beginn an und eine umfassende Dokumentation der Grünpflege und Wartung im laufenden Betrieb nach der Fertigstellung sind hier von großer Bedeutung.

Im Forschungsprojekt Green BIM arbeiten verschiedene Fachdisziplinen, wie Landschaftsarchitektur, Garten- und Landschaftsbau, Grünpflege und technische Wartung, technische Gebäudeausstattung und Bauphysik sowie die sozialwissenschaftlich orientierte Landschaftsplanung, zusammen, um die Verwendung von BIM in der Planung und Ausführung von Bauwerksbegrünungen voranzubringen. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Inno-

vation und Technologie (BMK) im Programm Stadt der Zukunft gefördert (Green BIM 2021). Die Abwicklung erfolgt über die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG (Projektnummer: 873526). Das Projektkonsortium besteht aus folgenden Organisationen: Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH (Konsortialführung), AEE INTEC, Building Smart, Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U., Flughafen Wien AG, Kräftner Landschaftsarchitektur, teamgmi Ingenieurbüro GmbH, TU Graz Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Fachbereich Integrated Building Systems und Vasko und Partner.

Im Forschungsprojekt „Green BIM“ werden aufbauend auf einer umfassenden Status-Quo-Analyse von bestehenden Bauwerksbegrünungen die Kriterien für eine BIM-basierte Planung über den gesamten Lebenszyklus (Planung, Ausführung, Pflege, Wartung) ausgearbeitet. Zudem wird geprüft, inwieweit für die Bauwerksbegrünung typische Planungsschritte mit branchentypischer Software BIM-gerecht bearbeitet werden können. Das Projekt möchte in einem ersten Schritt Bauwerksbegrünungen in BIM-Prozessen mitdenken und bestehende Standards (IFC / ISO 16739) zu deren Planungs- und Life-Cycle-Einbindung in BIM entsprechend ergänzen. Langfristig sollen auch die zur BIM-Modellierung von Bauwerksbegrünung erforderlichen Metadaten und Datenstrukturen in den IFC-Standard einfließen. Ziel des Projekts ist die Schaffung von Grundlagen für BIM-Modellierung von Bauwerksbegrünung zur friktionsfreien Planung, Herstellung, Wartung und Grünpflege. Es soll in Zukunft möglich sein Bauwerksbegrünungen von der ersten Idee bis zur Strategie und Planung, dem Bau, Betrieb und Nachnutzung einzuberechnen und auch den LifeCycle in den gesamten BIM-Prozess miteinzubinden.

2. BAUWERKSBEGRÜNUNG – EINE KOMPLEXE MATERIE

Zur Bauwerksbegrünung zählen Dachbegrünungen sowie Vertikalbegrünungen. Bei der Vertikalbegrünung von Gebäuden wird in erster Linie zwischen Fassadenbegrünung im Außenbereich des Gebäudes und Innenraumbegrünung unterschieden.

2.1 DACHBEGRÜNUNGEN

Bei den Aufbauten von Dachbegrünungen werden folgende Formen unterschieden:

- Reduzierte Extensivbegrünung, z.B. Sedum-Moos-Begrünung
- Extensivbegrünung, z.B. Sedum-Gras-Kraut-Begrünung
- Reduzierte Intensivbegrünung, z.B. niedrige Stauden-Begrünung
- Intensivbegrünung, z.B. Stauden-Gehölz-Begrünung

2.2 VERTIKALBEGRÜNUNGEN IM AUSSENRAUM

Eine Vertikalbegrünung der Fassade kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden. In Österreich wird die Vertikalbegrünung, dem Stand der Technik gemäß ÖNORM L 1136 „Vertikalbegrünung im Außenraum“ entsprechend, in fünf Kategorien von Vertikalbegrünungen unterteilt. Diese Kategorien unterscheiden sich im Wesentlichen in Bezug auf die Pflanzstandorte, wie bodengebundene, troggebundene oder wandgebundene Standorte. Das zweite Unterscheidungsmerkmal betrifft die Art der Pflanzen, wie Kletterpflanzen oder freistehende Pflanzen. Je nach Pflanzenart gibt es unterschiedliche Voraussetzungen im Hinblick auf das Gebäude und auf die Standortbedingungen. Große Unterschiede zeigen sich bei den verschiedenen Begrünungsformen beim Errichtungsaufwand und bei den erforderlichen Pflege- und Wartungsmaßnahmen. (dopheide et al. 2021)

Vertikalbegrünungen werden unterteilt in:

- Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Selbstklimmern: Hier werden selbstklimmende Kletterpflanzen verwendet, die direkt im Erdreich wachsen und keine Rankhilfe brauchen. Die Selbstklimmer wachsen auf den Fassadenflächen mithilfe ihrer Haftwurzeln oder Haftscheiben. Für die

Größe der zu begrünenden Fläche sind Wuchshöhe, Form der verwendeten Pflanzenarten und das Volumen des Wurzelraumes entscheidend.

- Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Rankhilfen und Kletterpflanzen: Es werden Kletterpflanzen verwendet, die im Erdreich wachsen, aber eine Rankhilfe brauchen. Die Kletterhilfen für die funktionale Begrünung müssen an die artspezifische Wuchsform der Pflanzenart angepasst werden. Kletterhilfen geben gemeinsam mit dem Volumen des Wurzelraumes Bereich und Umfang der zu begrünenden Fläche vor.
- Troggebundene Vertikalbegrünung: Auch bei dieser Art der Begrünung werden Kletterpflanzen verwendet. Im Gegensatz zur bodengebundenen Vertikalbegrünung wachsen die Kletterpflanzen dabei in aufgestellten Pflanztrögen. Bei dieser Art der Vertikalbegrünung können Kletterpflanzen an Fassaden verwendet werden, bei denen kein Erdanschluss möglich ist. Die zu begrünende Fläche entscheidet über die Pflanzenart und die Notwendigkeit von Rankhilfen.
- Wandgebundene Vertikalbegrünung – teilflächige Vegetationsträger: Der Lebensraum der Pflanzen, welche zur Vertikalbegrünung verwendet werden, wird komplett bodenunabhängig am Baukörper selbst geschaffen. Der Wurzelraum der Pflanze ist auf eine teilflächige Vegetationstragschicht mit Substrat begrenzt, das Begrünungssystem wird damit in den meisten Fällen zur hinterlüfteten Fassade. Für den Betrieb ist eine automatische Bewässerungsanlage notwendig, die eine regelmäßige, in manchen Fällen tägliche Versorgung der Pflanzen mit Wasser gewährleistet.
- Wandgebundene Vertikalbegrünung – vollflächige Vegetationsträger: Die Pflanzen wachsen am Gebäude bodenunabhängig in einer vollflächigen Vegetationstragschicht, welche in den meisten Fällen die Funktion einer hinterlüfteten Fassade erfüllt. Die modularen oder flächigen Vegetationsträger werden aus mehreren Vlieslagen mit oder ohne Substrat beziehungsweise aus anderen Trägerstoffen, wie Fasermatten oder Steinmodulen, aufgebaut. Je nach Aufbau finden die Pflanzen dort mehr oder weniger Wurzelraum und Halt zum Wachsen vor. Für den Betrieb ist eine automatische Bewässerungsanlage notwendig, die eine regelmäßige, bei Bedarf mehrmals tägliche Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen gewährleistet.

2.3 VERTIKALBEGRÜNUNGEN IM INNENRAUM

Gemäß der ÖNORM L 1133 „Innenraumbegrünung - Planung, Ausführung und Pflege“, ist eine Innenraumbegrünung ortsgebunden mit oder ohne Bodenanschluss, mobil, als Hydrokultur oder in Form von begrünten Wänden, also als Vertikalbegrünung, möglich. Vertikale Innenraumbegrünungen können mithilfe verschiedener Rahmen- und Trägerkonstruktionen aufgebaut werden. Die Pflanzen wachsen auf Hydrokulturen, auf Innenraums substraten, technischen Substraten oder auf der Basis von Vliesen. Die Nährstoffversorgung wird meist an die Bewässerung gekoppelt, welche, abhängig von der Ausführung, über eine automatisch gesteuerte Wasserzuleitung oder einen Wassertank erfolgt. Die Pflanzenauswahl für die Innenraumbegrünung richtet sich nach den Raumverhältnissen. Mit entsprechender Beleuchtung und Bewässerung sind punktuelle Standortverbesserungen möglich. Zu den bautechnischen Anforderungen der vertikalen Begrünung im Innenraum zählen neben den vegetationsgerechten Licht- und Klimaverhältnissen wurzelfeste und wasserdichte Pflanzgefäße sowie die ausreichende statische Belastbarkeit der zu begrünenden Fläche. Be- und Entwässerung müssen kontrollierbar sein. Zugänge müssen vorhanden sein, die das Austauschen und Pflegen von Pflanzen und die Wartung der technischen Einrichtungen ermöglichen.

3. BIM IN DER LANDSCHAFTSARCHITEKTUR

Während in Architektur- und Generalplanungsbüros bereits intensiv mit BIM (Building Information Modelling = eine Modelldatenbank, die alle Informationen enthält, die für die optimierte Planung, Ausführung und Bewirtschaftung eines Gebäudes erforderlich sind) gearbeitet wird, fehlen für die Landschaftsarchitektur und Vegetationstechnik bisher wesentliche Grundlagen (Brückner et al. 2019). Bis

dato ist eine konsistente und datenverlustfreie BIM-Modellierung von Bauwerksbegrünung nur innerhalb von proprietären Datenformaten (closedBIM) möglich, da die Industry Foundation Classes (IFC)-Schnittstelle von BIM-Modellierungssoftware für offenen Datenaustausch (openBIM) noch nicht fähig ist, Bauwerksbegrünung hinreichend abzubilden.

3.1 ANALYSESCHRITTE

Green BIM bereitet die Integration von Bauwerksbegrünungen in BIM-Modellen auf mehreren Ebenen vor. Angelehnt an den internationalen IFC-Standard sollen für die verschiedenen Fachdisziplinen, die in der Bauwerksbegrünung tätig sind, jeweils passende Strukturkomponenten (Domain/Klasse/Typen/Merkmale) erarbeitet werden, damit digitale Planungs-, Bauprozess- und Betriebsmanagementprozesse in der Bauwerksbegrünung ermöglicht bzw. unterstützt werden. Zusätzlich werden Musterdokumente für Auftraggeber-Informationsanforderungen, Phasenmodelle und Case Studien (Prozessmuster) erarbeitet. Diese Ergebnisse bilden die optimale Grundlage für eine zukünftig digital verschränkte Arbeit von Architektur und Bautechnik mit Bauwerksbegrünungen.

Aufbauend auf dieser umfassenden Status-Quo-Analyse mit der Bandbreite an Bauwerksbegrünungsarten und -kategorien wurden unter Einbeziehung des Stands der Technik, Normen (ÖNORM), aus (vegetations-)technischen Regelwerken und weiteren Regelwerken wie den FLL- Richtlinien sämtliche BIM-relevanten Daten aufgearbeitet. Durch die Analyse konkreter Fallbeispiele wurden im weiteren Projektverlauf die Kriterien für eine BIM-basierte Planung über den gesamten Lebenszyklus ausgearbeitet. Darauf aufbauend wurde eine Analyse von erforderlichen Parametern und Attributen für die gesamte Prozesskette „Planung – Bau – Betreiben mit Grünpflege, Wartung und Instandhaltung“ durchgeführt.

Zunächst wurden dabei unterschiedlichste Produktgruppen, Baustoffe und Pflanzen, die im Zuge der Herstellung von Bauwerksbegrünungen eingesetzt werden, zusammengetragen. Es wurden Komplettsysteme von Bauwerksbegrünungs-Herstellern, einzelne Komponenten zu Fassaden- und Dachbegrünungen sowie beispielsweise relevante Unterkonstruktionen in Excel-Listen gebündelt und für die weitere Datenverarbeitung aufbereitet. Die Daten umfassen die Planungsparameter für Bauwerksbegrünungen, insbesondere für komplexe wand- und dachgebundene Systeme, weitere Einflussfaktoren auf die Planung und Umsetzung von Gebäudebegrünungen geeignete Pflanzen und deren Wüchsigkeit/Deckungsgrad, Standortansprüche usw. sowie die Grünpflege, Wartung und Instandhaltung im laufenden Betrieb. Anforderungen und Lücken wurden aufgezeigt, wie z.B. erforderliche Detaillierungsgrade in der Planung, Pflanzenarten, Dünger, Pflanzenschutzmittel und technische Substrate.

3.2 VORSCHLÄGE FÜR EINEN IFC-STANDARD AUS SICHT DER BAUWERKS-BEGRÜNUNG

In Anlehnung an die Struktur und Inhalte des aktuell gültigen IFC-Standards arbeitet das Team rund um Green BIM an Metadaten, welche jene für die BIM-basierte Planung, Herstellung, Wartung und Grünpflege erforderlichen Attribute beinhalten. Folgende Elemente der Bauwerksbegrünung werden dabei betrachtet:

- Horizontale Bauwerksbegrünung
- Vertikale Bauwerksbegrünung
- Innenraumbegrünung

Als Vorbereitung für die Implementierung in die BIM-Metadatenbank BIMQ wurde die gesamte bisherige Datenerhebung zunächst in Excel-Listen weiter aufbereitet. Der erste Schritt dieser Tätigkeiten besteht in der Erhebung der erforderlichen Attribute. Hierfür wurden einschlägige Normen, Datenblätter, Projektunterlagen bereits umgesetzter Bauwerksbegrünungen und auch Wissen und Erfahrungen des Projektkonsortiums aus der Praxis herangezogen.

Im nächsten Schritt wurden diese Attribute ähnlich dem IFC-Standard zu sogenannten Merkmalsätzen (Mset) zusammengefasst. So wurden beispielsweise Attribute, welche bei der Modellierung aller

betrachteten Elemente der Bauwerksbegrünung erforderlich sind, zu dem Mset „Begrünung Allgemein“ zusammengefasst. Es wurden Merkmalsets angelegt, wie beispielsweise für Vertikalbegrünung, Dachbegrünung, Pflanzgefäße oder Bewässerungstechnik. Spezifischere Attribute wurden zu eigenen Msets zusammengefasst, wie die folgende Tab. 1 am Beispiel des Mset „Kletterpflanze“ zeigt:

Tab. 1: Gruppierung von Attributen am Beispiel der kletterpflanzentypischen Attribute.

Gruppierungen (1. Ebene)	Attribute (2. Ebene)	Auswahlmöglichkeiten (optional) (3. Ebene)
Mset_Kletterpflanze	Kletterform	<i>Schlinger</i> <i>Blattranker</i> <i>Sprossranker</i> <i>Spreizklammer</i> <i>Wurzelkletterer</i> <i>Haftscheibenranker</i>
	Selbstklammer	
	Gerüstkletterpflanze	
	Wuchsstärke	
	Triebdurchmesser Wurzelhals	
	Lichtfliehende Triebe	
	vertikales Flächengewicht	
	Eignung Pflanzgefäß	

Zusätzlich werden für diese Attribute auch Phaseninformationen erstellt, also Informationen darüber, wann welche Fachplanerinnen bzw. Fachplaner in einem BIM-Projekt für die erstmalige Definition eines Attributs verantwortlich sind. Im Anschluss daran werden diese Metadaten in einer Datenbank für BIM-Anforderungsmanagement (BIMQ) strukturiert, was bedeutet, dass alle betrachteten Bauwerksbegrünungskomponenten durch Zuweisung von Msets mit allen für die im Projekt betrachteten BIM-Anwendungsfälle erforderlichen Attributen ausgestattet werden.

Die fertig befüllte und strukturierte Datenbank kann als Vorschlag angesehen werden, wie Bauwerksbegrünung im IFC-Standard implementiert werden könnte. Zusätzlich können aus der Datenbank Level-of-Information-Definitionen (LoIs) für die genannten Bauwerksbegrünungskomponenten abgeleitet werden – sowohl als PDF-Dokumentation als auch in einem direkt für BIM-Modellierungssoftware lesbaren Format.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die disziplinübergreifende Materie der Bauwerks- und Gebäudebegrünung stellt ein komplexes Planungssystem dar, das immer schnittstellen- und gewerkeübergreifend zu bearbeiten ist. Vor allem hochtechnisierte Fassaden- und Dachbegrünungen verlangen eine gesamtheitliche durchdachte Planung, die abseits der Ausführung und Installation auch den laufenden Betrieb und die Grünpflege und technische Wartung der Grünsysteme miteinschließt.

Dies macht eine frühzeitige/rechtzeitige Integration von Bauwerksbegrünung in BIM-Modelle umso wichtiger. BIM-basierte Bauwerksbegrünungen fördern den Ansatz, Begrünungen und Grünstrukturen gleich mit dem Gebäude, beginnend von der ersten Entwurfsidee entlang der gesamten Prozesskette – Planen, Bauen und Betreiben – mitzudenken, zu simulieren, zu berechnen, zu planen und zu betreiben und damit dem Auftraggeber/der Auftraggeberin als überzeugende Lösung darzustellen. Mit diesen, im Projekt Green BIM erstmals formulierten, Grundlagen werden die Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur, die Vegetationstechnik und speziell Bauwerksbegrünungen auf eine Teilnahme an offenen BIM-Prozessen vorbereitet.

Durch die Umsetzung der Bauwerksbegrünung mit BIM ergeben sich mehrere Vorteile:

- Mehr Transparenz
- Mehr Zuverlässigkeit
- Verbesserung der Zusammenarbeit durch Kommunikation auf Augenhöhe
- Kosteneinsparungen
- Nachweispflichten sind leichter zu erfüllen
- Mehr Miteinbezug der Öffentlichkeit

Von den Ergebnissen des Projekts profitieren alle mit Bauwerksbegrünungsplanung/-pflege befassten Unternehmen, Organisationen, Technologieanbieter, Bauherren, Behörden und Ämter sowie das Facility Management und folgende Disziplinen erhalten einen Technologieschub: Bauwerksbegrünung, Vegetationstechnik, Landschaftsarchitektur, Landschaftsplanung, technische Wartung und Instandhaltung sowie die Grünpflege.

LITERATUR

- Brückner I.; Wozniak M.; Maßling N. & Thieme-Hack M. (2019): BIM-Workflow für Landschaftsarchitekten: ein Praxisbeispiel. In: Journal of Digital Landscape Architecture (4), S. 131–139. https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/DLA_2019/537663014.pdf (27.01.2020).
- Dopheide R., Hollands J., Knoll B., Korjenic A., Mitterböck, M., Pitha U. et al. (2021): greening UP! Nachhaltige Grünpflege, Wartung, Instandhaltung von Vertikalbegrünungen inklusive rechtlicher Aspekte. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (Berichte aus Energie- und Umweltforschung). Online verfügbar unter <https://www.b-nk.at/leitfaden-greening-up/>, zuletzt geprüft am 03.08.2021.
- Green BIM (2021) Green BIM - Bauwerksbegrünung als Teil BIM-basierter Planung und Pflege, gefördertes Projekt im Programm Stadt der Zukunft der FFG, <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/green-bim.php>
- ÖNORM L 1131 (2010): Gartengestaltung und Landschaftsbau - Begrünung von Dächern und Decken von Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführungen und Erhaltung
- ÖNORM L 1133 (2017): Innenraumbegrünung - Planung, Ausführung und Pflege.
- ÖNORM L 1136 (2021): Vertikalbegrünung im Außenraum.

KONTAKTDATEN:

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Bente Knoll
 B-NK GmbH
 Schönbrunner Straße 59-61/10
 1050 Wien
 E-Mail: bente.knoll@b-nk.at

Informationsintegration von BIM Daten mit BES und CFD Simulationen

H. Gursch

Know-Center GmbH, Graz, Österreich

M. Pramhas

Thomas Lorenz ZT GmbH, Graz, Österreich

B. Knopper

IKK Engineering GmbH, Graz, Österreich

D. Brandl

TU Graz - Institut für Wärmetechnik, Graz, Österreich

M. Gratzl

FH Salzburg - Smart Building, Kuchl, Österreich

E. Schlager, R. Kern

Know-Center GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: Im Projekt COMFORT (Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room condiTions) wird die Behaglichkeit von Büroräumen mit Simulationen und datengetriebenen Verfahren untersucht. Während die datengetriebenen Verfahren auf Messdaten setzen, benötigt die Simulation umfangreiche Beschreibungen der Büroräume, welche sich vielfach mit im Building Information Model (BIM) erfassten Informationen decken. Trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren, ist die Integration von BIM und Simulation noch nicht vollständig automatisiert. An dem Fallbeispiel der Aufstockung eines Bürogebäudes der Thomas Lorenz ZT GmbH wird die Übergabe von BIM-Daten an Building Energy Simulation (BES) und Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen untersucht. Beim untersuchten Gebäude wurde der gesamte Planungsprozess anhand des BIM durchgeführt. Damit konnten Einreichplanung, Ausschreibungsplanung für sämtliche Gewerke inkl. Massenableitung, Ausführungspläne wie Polier-, Schalungs- und Bewehrungspläne aus dem Modell abgeleitet werden und das Haustechnikmodell frühzeitig mit Architektur- und Tragwerksplanungsmodell verknüpft werden.

Ausgehend vom BIM konnten die nötigen Daten im IFC-Format an die BES übergeben werden. Die verwendete Software konnte aber noch keine automatische Übergabe durchführen, weshalb eine manuelle Nachbearbeitung der Räume erforderlich war. Für die CFD-Simulation wurden nur ausgewählte Räume betrachtet, denn der Zusatzaufwand zur Übergabe im STEP-Format ist bei normaler Bearbeitung des BIM immer noch sehr groß. Dabei muss der freie Luftraum im BIM separat modelliert und bestimmte geometrischen Randbedingungen erfüllt werden. Ebenso müssen Angaben zu Wärmequellen und Möbel in einer sehr hohen Planungstiefe vorliegen. Der Austausch von Randbedingungen an den Grenzflächen zwischen Luft und Hülle musste noch manuell geschehen.

Die BES- und CFD-Simulationsergebnisse sind bezüglich ihrer Aussagekraft mit denen aus herkömmlichen, manuell erstellten Simulationsmodellen als identisch zu betrachten. Eine automatische Übernahme von Parameterwerten scheidet momentan noch an der mangelnden Interpretier- bzw. Zuordenbarkeit in der Simulationssoftware. In Zukunft sollen es die Etablierung von IFC 4 und zusätzlicher Industry Foundation Class (IFC) Parameter einfacher machen die benötigten Daten im Modell strukturiert zu hinterlegen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Integration von Raumbuchdaten in BIM zu legen, da diese Informationen nicht nur für die Simulation von großem Nutzen sind. Diese Informationsintegrationen sind nicht auf eine einmalige Übermittlung beschränkt, sondern zielen auf eine Integration zur automatischen Übernahme von Änderungen zwischen BIM, Simulation und anknüpfenden Bereichen ab.

1. EINLEITUNG

Die wahrgenommene Behaglichkeit in Gebäuden ist eine wichtige Eigenschaft, welcher in Planung, Bau und Betrieb von Gebäuden Rechnung getragen werden muss. Die Einflussgrößen auf die wahrgenommene Behaglichkeit sind vielfältig und zum Teil auch subjektiv, wie z.B. Konstitution, Verfassung, Kleidung und Tätigkeitsart. Daneben gibt es aber auch objektiv messbare Einflüsse wie Lufttemperatur, relative Feuchte, Luftströmungen, Lärm, Beleuchtung etc. (Schild & Willems 2013). Das Projekt COMFORT (Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room condiTions) untersucht die thermische Behaglichkeit von Büroräumen mit Simulationen und datengetriebenen Verfahren (Feichtinger et al. 2020).

Während die datengetriebenen Verfahren auf Messdaten setzen, benötigt die Simulation umfangreiche Beschreibungen der Räume, welche heute schon oft in Building Information Model (BIM) erfasst sind, auch wenn die Abstraktionsgrade oft sehr unterschiedlich sind. Trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren, ist die Integration von BIM und Simulation noch nicht vollständig automatisiert. An einem Fallbeispiel untersucht COMFORT wie BIM-Daten in den Modellierungsprozess von Building Energy Simulation (BES) und Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen integriert werden können. Dies wird an der Aufstockung eines Bürogebäudes untersucht und ein Ausblick erarbeitet, wie eine Raumbuchintegration zukünftig tiefere Integration zwischen BIM, Simulationen und Nutzungsbeschreibung ermöglichen könnte. Kapitel 2 gibt einen Überblick über den Stand der Forschung und Kapitel 3 beschreibt die untersuchte Aufstockung. Kapitel 4 und 5 legen die Ergebnisse aus der BIM-Nutzung für BES- und CFD-Simulation dar. Kapitel 6 fasst die Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2. LITERATUR

Die automatische Erstellung von Simulationsmodellen aus BIM ist schon wegen der vielen unterschiedlichen Gebäudesimulationen wie z.B. Erdbebenverhalten (Ziegler 2017), Energieverbrauch, Licht, Akustik oder Luftströmungen (Malkawi & Augenbroe 2004) noch nicht für jeden Anwendungsfall möglich. Dennoch, oder gerade deswegen, gibt es viele Bestrebungen um mit geeigneten Software-Werkzeugen Simulationsmodelle teilweise oder vollständig automatisiert aus BIM abzuleiten bzw. mit Daten und Parametern zu versorgen, was über eine Vielzahl an Schnittstellen geschehen kann (Wieder et al. 2020). Der Datenaustausch zwischen BIM und Simulation geschieht meist über das Green Building XML (gbXML) Schema oder das Industry Foundation Class (IFC) Format, jedoch können nicht immer alle nötigen Informationen vollständig übertragen werden (Hosseini et al. 2021).

Chen et al. (2018) zeigen einen Austausch im gbXML Format, welchem lineare Geometrie leichtfällt, aber bei gerundeten Wänden, Heizungs- und Kühlzonen mit Schaltzeiten und -punkten problematisch ist. Chong et al. (2019) kombinieren gbXML Dateien mit einer eigens entwickelten Software um auch Materialeigenschaften, interne Lasten und Informationen zur Heizung, Lüftung und Klimatechnik zu übertragen. Reynders et al. (2017) stellen eine Software vor, welche BIM-Daten im IFC-Format einlesen kann und mit einstellbaren Vereinfachungen an Modellica für die BES übergeben kann. Lee et al. (2021) nutzen das IFC-Format um Geometrieinformationen und Wandaufbauten in die CFD-Simulation zu übertragen. Gan et al. (2018) wenden BIM-Information bei BES- und CFD-Simulation gemeinsam an, um die Behaglichkeit und den Energieverbrauch zu bestimmen.

3. OBJEKT UND BUILDING INFORMATION MODEL

Die Büroerweiterung für die Thomas Lorenz ZT GmbH wurde als Aufstockung auf das bestehende 2-geschossige Bürogebäude konzipiert und ist in Abb. 1 gezeigt. Hierzu gehören neben der eigentlichen Bürofläche auch noch Sozial-, Sanitär- und Abstellräume, ein Serverraum, sowie ein Seminarraum.

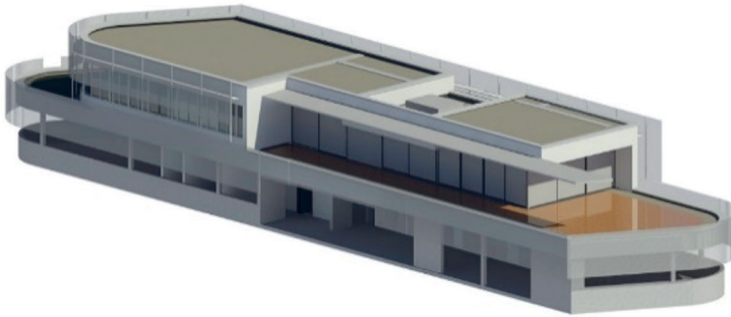


Abb. 1: 3D-Ansicht des bestehenden 1. Obergeschosses und des neuen 2. Obergeschosses

Der Planungsstart für die Aufstockung erfolgte auf der konventionellen 2D-Planungsgrundlage für das bestehende Gebäude. Jedoch bereits nach dem ersten Entwurf wurde die Planung nicht nur auf eine 3D-Planung aufgesetzt, sondern durch die direkte Verknüpfung mit dem ebenfalls in 3D vorliegenden Haustechnikmodell zum BIM gewandelt. Die Kollisionsprüfung wird dadurch wesentlich vereinfacht. Die gesamte weitere Planung wurde mit Ausnahme der Elektroplanung schließlich mit Autodesk Revit abgewickelt und umfasst die Einreichplanung, Ausschreibungsplanung für sämtliche Gewerke inkl. Massenableitung aus dem Modell, Ausführungsplanung wie Polier-, Schalungs- und Bewehrungspläne, und auch statische Berechnungen mit bidirektionaler Schnittstelle zwischen Softistik und Revit.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Abrechnung mit den beauftragten Firmen aufgrund der, bereits der Ausschreibung beiliegenden, aus dem BIM erzeugten Massenpläne rasch und frictionsfrei erfolgen konnte. Weiters konnten kleine Planungsergänzungen zu einem späten Zeitpunkt direkt in allen Planunterlagen, und für alle Beteiligten sichtbar, zentral am BIM konsistent nachgeführt werden.

4. BUILDING ENERGY SIMULATION

Die BES übernimmt in erster Linie die im BIM enthaltenen Raumdefinitionen, welche als IFC-Spaces ausgegeben wurden. Zusätzlich wurden auch die geografische Ausrichtung, Wand- und Deckenaufbauten, Verschattungselemente sowie Fensterflächen übernommen. Die Übergabe erfolgte mittels einer IFC-Datei im Format 2x3. Nach einer ersten Prüfung und Import in die beiden Simulationsprogramme IDA ICE und AbstractBIM wurden festgestellt, dass die geografische Ausrichtung des Gebäudes beim Import in die BES nicht richtig übernommen wurde, die Geometrie des IFC-Space im abgerundeten Bereich des Gebäudes nicht richtig erkannt wurde, die übermittelte Raumhöhe des IFC-Space anders als durch die Simulation erwartet definiert war, die Verschattungselemente nicht übernommen wurden und Fensterelemente in den Fassadenflächen nachträglich in der BES zu modellieren sind.

In allen oben angeführten Punkten war eine manuelle Nachbearbeitung der Geometrie in der BES-Software notwendig. Die Abklärung der Problempunkte erfolgte mittels mehrerer BIM Collaboration Format (BFC)-Issues. Damit lieferte die BES aussagekräftige Ergebnisse wie in Abb. 2 dargestellt. Die Büroaufstockung war zu dem Zeitpunkt bereits in Betrieb, und die Behaglichkeit konnte so bestätigt werden, insbesondere da die Nutzung exakt der vorhergehenden Planung entspricht.

5. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION

Die Zusammenarbeit zwischen BIM und CFD-Simulationssoftware wurde anhand eines Einzelbüros mit dem Ziel durchgeführt, dass keine Änderung oder Anpassung der übergebenen Geometrie in der CFD-Modellierungssoftware nötig sein sollen. Die CFD-Simulation benötigt den verbleibenden freien Luftraum zwischen den Bauteilen und der Einrichtung. Dieser Luftraum ist jedoch in keinem BIM per se vorhanden. Der Aufwand für die separate Modellierung eines solchen Luftraumes ist im Vergleich zur Planung als sehr hoch einzustufen. Weiters erfordert eine sinnvolle Anwendung einer CFD-Simulation bereits eine sehr hohe Planungs- bzw. Modellierungstiefe, da hierfür das zukünftige Inventar, Wärmequellen, Heizung-, Lüftung- und Sanitär-Bauteile (HLS) bereits exakt im Raum verortet sein müssen.

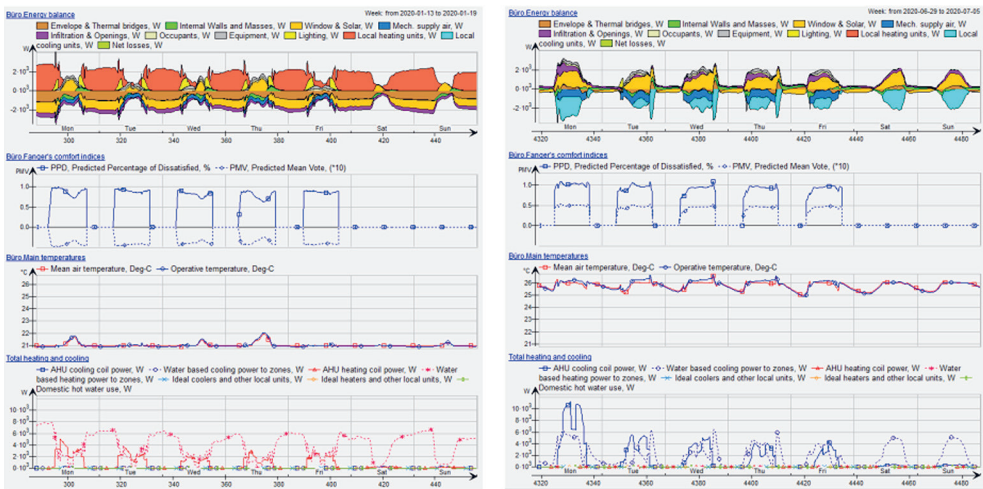


Abb. 2: Simulationsergebnisse für Energie und Behaglichkeit.

Die Modellierung des Luftraumes sollte mit einfachen Körpervolumen möglichst ohne Boolesche Operationen erfolgen um ein möglichst einfaches Modell zu erhalten. Dennoch musste das Luftkörpermodell mehrfach im BIM angepasst werden da sich Unstetigkeiten in der Simulation ergeben haben. In der Regel waren hierfür zu schmale Luftbereiche verantwortlich, welche keine brauchbare Vernetzung zuließen. Die Eingabe von Randbedingungen an den Grenzflächen zwischen Luft und Hülle musste in der CFD-Software manuell geschehen. Die Übergabe an die CFD-Software erfolgte im flächenbasierten STEP-Format. Da Revit jedoch nur einen Bauteil- bzw. Körperorientierten Export unterstützt, wurde der im Ansichtsbereich isolierte Luftraum als 3D-DWG ausgegeben, welcher dann mit dem Programm Rhino in eine flächenbasierte STEP-Datei umgewandelt wurde. Das finale Netz besteht aus ca. 850.000 Zellen, für die Temperatur, Luftströmungsgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, etc. ausgewertet wurden. Abb. 3 und Abb. 4 zeigen zwei stationäre Sommer und Winter Fälle.

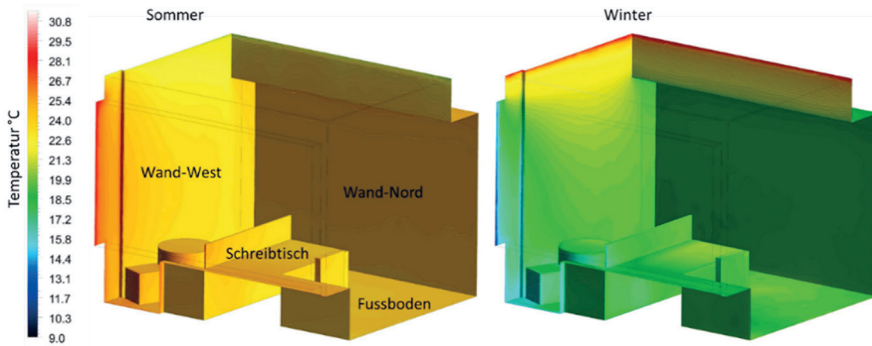


Abb. 3: Oberflächentemperaturkonturen im Innenraum aus CFD Simulation

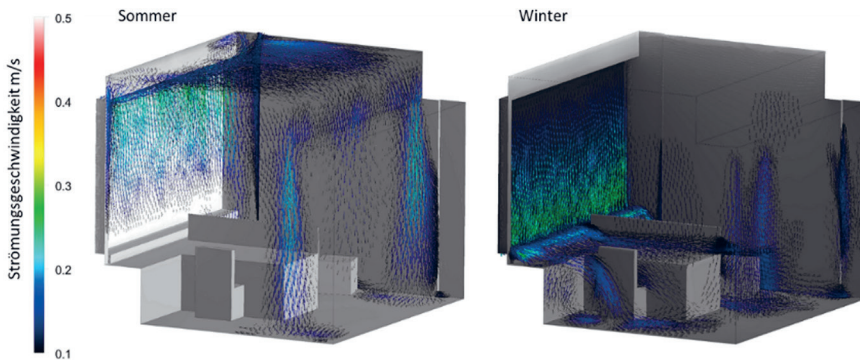


Abb. 4: Darstellung der CFD-Strömungsvektoren im Bereich zwischen 0,1 und 0,5 m/s

6. ANFORDERUNGEN FÜR DIE INTEGRATION VON BUILDING INFORMATION MODELS UND SIMULATIONEN

Auch wenn bereits viele Informationen von BIM zu BES- und CFD-Simulation übertragen werden können, so ist die Übertragung von Ausstattung- und Nutzungsinformationen aus dem sog. Raumbuch aktuell noch nicht durchgängig möglich. Um jedoch benötigte Raumbuchdaten bereits in der Planung und somit auch für frühe Simulationen nutzen zu können, sollten Raumbuchfunktionen direkt in die jeweilige BIM-Software aufgenommen und über die IFC-Schnittstelle korrekt exportiert werden. Aktuell benötigt man noch einen Raumbuchaufsatz für die BIM-Software um die Daten vollständig zu verknüpfen und einen bidirektionalen Datenaustausch zu ermöglichen.

Generell wird es durch die Etablierung von IFC 4 und zusätzlichen IFC-Parametern einfacher sein die benötigten Daten im Modell strukturiert zu hinterlegen. Diese Lösungen müssen den gesamten Prozess mit allen nötigen Daten umfassen, um die Nachbearbeitung in den BES- und CFD-Programmen zu minimieren. Die Integration kann über automatische Verknüpfungen oder Vergleichstabellen zur Zuordnung eine einfache Anreicherung des IFC-Modells mit fehlenden Daten ermöglichen, besonders wenn cloudbasierte Lösungen mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche dafür bereitstehen. Das Ziel ist eine automatische Übernahme von Änderungen zwischen BIM und BES-bzw. CFD-Simulation, und nicht nur die einmalige Übermittlung von Informationen.

Die Integration ist natürlich bidirektional zu verstehen, da die Simulationsergebnisse einen Mehrwert für das BIM darstellen und auch von anderen Disziplinen bzw. Fachplanern verwendet werden können. Ebenso sind die von der Simulation benötigten Raumbuchdaten wie z.B. die Anzahl von Personen bzw. Arbeitsplätzen in einem Raum, auch für andere BIM Anwendungsfelder wie die Fluchtwegplanung oder Überprüfung von arbeitsrechtlichen Vorschriften relevant.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die BES- und CFD-Simulationsergebnisse sind bezüglich ihrer Aussagekraft mit jenen aus herkömmlichen, manuell erstellten Simulationsumgebungen als identisch zu betrachten. Bereits jetzt ist durch die Übernahme geometrischer Daten ein geringerer Modellierungsaufwand in der Simulationssoftware feststellbar, insofern es sich um den Erstimport handelt. Im Falle der BES-Software funktionierte die Zuordnung von IFC-Spaces gut. Die effiziente Modellierung des Luftraumes für eine CFD-Simulation erfordert dagegen noch eine gewisse Erfahrung um brauchbare Ergebnisse zu bekommen. Zwischen BIM und BES- bzw. CFD-Simulation ist eine wiederholte oder gar bidirektionale Datenübergabe momentan nur mit Mehraufwand bzw. gar nicht möglich. Eine automatische Übernahme von Parameterwerten aus dem BIM in die Simulationssoftware scheidet noch an der mangelnden Interpretier- bzw. Zuordenbarkeit innerhalb der Simulationssoftware. Sobald von Seiten der Softwarehersteller für Simulationsprogramme dezidierte Datenanforderungspunkte definiert werden, und auch die Übernahme von Geometriedaten im IFC 4 Format gelingt, wird ein automatisierter Datenaustausch möglich. Im Zuge dessen sollen auch Raumbuchdaten in BIM integriert und auf dieselbe Weise ausgetauscht werden, da diese Daten einerseits für die Simulation wichtig sind, aber auch für Fluchtwegplanung oder Arbeitsrecht relevant sind. Dies bedingt eine entsprechende Unterstützung durch BIM und Simulationssoftware, sodass diese Informationsintegration auch eine Automatisierung der Zusammenarbeit beinhaltet und somit eine Effizienzsteigerung ermöglicht.

DANKSAGUNG

Das Know-Center wird im Rahmen des österreichischen Kompetenzzentren-Programm COMET (Competence Centers for Excellent Technologies) unter der Schirmherrschaft des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, des österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend sowie durch das Land Steiermark gefördert. COMET wird von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG verwaltet. Dieses Projekt wird durch das Förderprogramm „IKT der Zukunft“ (6. Ausschreibung 2017) der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) unterstützt.

LITERATUR

- Chen S., Jin R. & Alam M. (2018) Investigation of Interoperability Between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Simulation (BES). *International Review of Applied Sciences and Engineering* (2062-0810) 9(2), pp. 137-144.
- Chong A., Xu W., Chao S. & Ngo N.-T. (2019) Continuous-Time Bayesian Calibration of Energy Models using BIM and Energy Data. *Energy & Buildings* (0378-7788) 194, pp. 177-190.
- Feichtinger G., Gursch H., Schlager E., Brandl D. & Gratzl M. (2020) COMFORT – Data-Driven Analysis and Simulations of Human Comfort in Office Rooms, *Symposium Energieinnovation 2020*, Online: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_G3/736_LF_Feichtinger.pdf, letzter Zugriff am 15. September 2021.

- Gan V.J.L., Deng M. Tan, Y. Chen, W. & Cheng J.C.P. (2019) BIM-Based Framework to Analyze the Effect of Natural Ventilation on Thermal Comfort and Energy Performance in Buildings. In: Proceedings of the 10th International Conference on Applied Energy (ICAE 2018). Hong Kong, China: Energy Procedia (Energy Procedia) 158, pp. 3319-3324.
- Hosseini S.M., Shirmohammadi R., Kasaeian A. & Pourfayaz F. (2021) Dynamic Thermal Simulation Based on Building Information Modeling: A Review. International Journal of Energy Research (0363-907X) 45 (10), pp. 14221-14244.
- Lee M., Park G., Jang H. & Kim C. (2021) Development of Building CFD Model Design Process Based on BIM. Applied Sciences (2076-3417) 11 (3), pp. 1-18.
- Malkawi A.M. & Augenbroe G. (Hrsg.) (2004) Advanced Building Simulation. New York, USA: Spon Press.
- Reynders G., Andriamamonjy A., Klein R. & Saelens D. (2017) Towards an IFC-Modelica Tool Facilitating Model Complexity Selection for Building Energy Simulation. In: Proceedings of the 15th IBPSA Conference: Building Simulation 2017. San Francisco, USA: International Building Performance Simulation Association.
- Schild K. & Willems W.M. (2013) Wärmeschutz, Grundlagen - Berechnung – Bewertung. 2. Auflage. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien.
- Wieder S., Gratzl M. & Reiter T. (2020) Einbindung der bauphysikalischen Fachbereiche Schall-, Feuchte- und Brandschutz in den BIM-Planungsprozess. In: Proceedings of the 8th Conference of IBPSA Germany and Austria (BauSIM2020). Graz, Austria: Graz University of Technology.
- Ziegler A. (2017) Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien.

KONTAKTDATEN:

Heimo Gursch

Inffeldgasse 13/6

8010 Graz

Email: hgursch@know-center.at

Beitrag der BIM-Methodik zur CO₂-Reduktion – eine Potentialanalyse

C. Müller-Thiede, N. Königshofer

M.O.O.CON GmbH, Wien, Österreich

D. Deutschmann

Heid und Partner Rechtsanwälte GmbH, Wien, Österreich

M. Warzecha

Mensch und Maschine Austria GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: The fact that the construction sector is not meeting climate targets due to record high CO₂ emissions is a well-known problem, but it has not yet been sufficiently understood that these can be significantly reduced as early as the planning phase. 39 % of global CO₂ emissions are caused by the production, transportation, and use of building materials, as well as by building operations.

Usually, the energy consumption during the operation of a building is considered as the primary factor for achieving CO₂ savings, but not the limitation of the environmental impacts that occur during the production, deconstruction and disposal of the materials used. The reason for this is that the building sector has so far focused on increasing energy efficiency and the use of renewable energies. However, as the energy efficiency of buildings advances, predictable minimization in operation is also ensured, pushing it further into the background.

Despite this realization, however, what often comes second is the fact that material-bound CO₂ emissions, also known as gray emissions, can account for up to 80 % of greenhouse gases over the entire life cycle, especially for high energy efficiency standards. Internal studies have also shown that the consumption in the building operation, in comparison between an existing building (built in 1984) and a new building (according to the current OIB guideline), regarding the CO₂ emissions in an observation period of 30 years falls from four times the production to 1.8 times. BIM, as a planning method that is now becoming more and more widespread, offers the possibility of mapping all relevant component information as well as specific characteristic values by means of multidimensional, digital building models. By integrating the gray energy and other life cycle assessment data into the BIM methodology, it should be possible to determine directionally reliable decisions regarding the formulated climate targets at an early stage, so that these can also be implemented in daily practice.

1. EINLEITUNG

Bezugnehmend auf den Bericht des UN-Umweltprogramms 2020 erreicht der Bau- und Gebäudesektor betreffend den Treibhausgasausstoß zurzeit weltweit einen Höchstwert. Wir sprechen hierbei von 38 % der globalen CO₂-Emissionen (rund 10 GtCO₂), welche durch die Herstellung, den Transport und die Verwendung von Baumaterialien, sowie durch den Gebäudebetrieb entstehen (Hamilton & Rapf 2020). Fakt ist, dass wir, und damit ist die Gesamtheit der Bauindustrie gemeint, aktuell vor der größten Herausforderung aller Zeiten stehen und nun schnellstmöglich gehandelt werden muss.

1.1 VERSTECKTE PROBLEMATIK

Üblicherweise wird zur Erzielung von CO₂-Einsparungen primär der Energieverbrauch während des Gebäudebetriebs, nicht aber die Einschränkung jener Umweltauswirkungen, die bei der Produktion, dem Rückbau und der Entsorgung verwendeter Materialien entstehen, betrachtet. Grund dafür ist, dass im Bausektor bislang vorwiegend die Steigerung der Energieeffizienz und der Einsatz erneuerbarer

Energien adressiert wurden. Mit dem Voranschreiten der Energieeffizienz von Gebäuden (Niedrigstenergie-Gebäudestandard 2021 (Tuschinski 2020)) wird jedoch auch die vorhersehbare Minimierung im Betrieb gewährleistet, wodurch dieser weiter in den Hintergrund rückt.

Was trotz dieser Erkenntnis aber oft erst an zweiter Stelle kommt ist die Tatsache, dass die materiellgebundenen CO₂-Emissionen, auch bekannt als graue Emissionen (Schmid 2019), insbesondere bei hohen Energieeffizienzstandards einen Anteil von bis zu 80 % der Treibhausgase über den gesamten Lebenszyklus einnehmen können (Lambertz et al. 2019).

1.2 POTENTIALE SICHTBAR MACHEN

Interne Untersuchungen haben gezeigt, dass der Verbrauch im Gebäudebetrieb, im Vergleich zwischen einem Bestandsgebäude (Baujahr 1984) und einem Neubau (gem. OIB-Richtlinie Stand April 2019), betreffend die CO₂-Emissionen in einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren, vom vierfachen der Herstellung auf das 1,8-fache fällt.

Des Weiteren wurde auf Basis von Ökobilanz-Datensätzen zu Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen (ÖkobaDat, BMI, Version 2021-2) Vergleichswerte der CO₂-Emissionen aufgestellt um zu veranschaulichen, wo die größten Wirkungsbereiche in unterschiedlichen Varianten liegen. Anbei das Beispiel der CO₂-Bilanz einer Standard-Bürofläche:

Ausgehend von einem Bürobereich mit insgesamt 525 m², bestehend aus 14 Büromodulen zu je 25 m² und einer zentralen Begegnungsfläche von 175 m², wurde auf Basis der zur Verfügung gestellten Werte der ÖkobaDat der Einsatz von herkömmlichen Materialien im Vergleich zu CO₂-freundlicheren Materialien untersucht.

Zur besseren Veranschaulichung wurde das Modell in drei Phasen geteilt. In der ersten Phase wurde der Ist-Stand der verbauten Materialien analysiert und die CO₂-Bilanz aufgezeigt. In Phase 2 ging es darum, alle verbauten Materialien durch CO₂-sparendere Materialien zu ersetzen und in Phase 3 wurden letztlich die in der Herstellung am CO₂-sparendsten Materialien verwendet. Befasst man sich einzig mit dem Einflussfaktor der Herstellung verwendeter Materialien und lässt den Aspekt der Entsorgung erstmal unbeachtet, so wird schnell klar, dass man hier große CO₂-Einsparungen erzielen kann. Lässt man die Entsorgung jener Materialien miteinfließen, so geht ein Großteil dieser Einsparungen zwar wieder verloren, jedoch reduzieren sich die Gesamtemissionen immer noch sehr deutlich.

Diese Hebel tragen wesentlich zum Aufzeigen der Problematik bei und helfen zudem, den CO₂-Emissionen entgegenzuwirken. Die Einsparung, unter Berücksichtigung aller Aspekte, liegt bei diesem Beispiel bei 80.147,6 kgCO₂, was 28 % des ursprünglichen Wertes ausmachen (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Auszug aus Anhang I: Veranschaulichung CO₂-gebundener Materialien

Element ¹	Übliche Materialien	CO ₂ -reduzierende Materialien		Einsparung gesamt	
		Phase 1	Phase 2		
	kg CO ₂	kg CO ₂	kg CO ₂	kg CO ₂	%
Außenwand	27.292,3	27.135,6	24.762,6	2.529,6	9,3
Fußboden	141.748,8	122.959,9	121.033,8	20.715,0	14,6
Decke	46.368,2	53.147,8	53.147,8	-6.779,6	² -14,6
Innenwand	64.5076,9	2.550,5	2.550,5	61.956,5	96,1
Außenfenster	3.299,9	2.522,7	1.694,6	1.605,3	48,7
Innentüre	1.094,4	1.094,46	973,6	120,7	11,0
Gesamt	284.310,4	209.410,9	204.162,9	80.147,6	28,2

¹ Hauptelemente im Fallbeispiel

² Negativwert aufgrund hoher CO₂-Emissionen in der Entsorgung

2. WAS SIND DIE GRÖSSTEN HEBEL IM GEBÄUDEENTWICKLUNGSPROZESS?

Zahlreiche Optimierungen in der Herstellung von Materialien, dem Gebäudebestand, der Technik von Heiz- und Kühlsystemen oder dem Energieverbrauch im eigenen Haushalt haben gezeigt, dass es möglich ist, den CO₂-Ausstoß auf verschiedenste Weisen zu verringern (Zechmeister 2021). Doch die eigentliche Frage, die wir uns als erstes stellen sollten ist: Was sind die größten Hebel in diesem Prozess?

2.1 DER UMGANG MIT DER KRISE

Bevor man beginnt, sich Gedanken über die Umsetzung einer Lösung zu machen, sollte man sich zuerst über die Unterschiede der Einflussfaktoren eines Problems bewusst sein. Bislang konzentrierte sich die EU-Politik auf das Konzept der „Fast-Null-Energie-Gebäude“ mit Fokus auf der Reduktion des Energieverbrauchs. Daraus resultierend entstehen bis heute Systeme zum verbesserten Gebäudebetrieb und dessen benutzerfreundlicher Anwendung. Diese Vorstellung wurde aber nun auch von den europäischen Wissenschaftsakademien (EASAC 2021) neu erfasst und soll darauf aufmerksam machen, die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Gemeint sind damit jene Emissionen, welche durch die Nutzung des Gebäudes im Betrieb aufkommen, als auch diejenigen, die durch die Herstellung von Baustoffen und während der Errichtung entstehen.

Um diesen Schritt zu vereinfachen und besser greifbar zu machen, haben wir uns mit den unterschiedlichsten Indikatoren auseinandergesetzt, die es benötigt, um ein Gebäude zu errichten, verbessern oder umzunutzen.

2.2 EINFLUSSFAKTOREN AUF CO₂-EMISSIONEN

Aktuelle Trends, dass das Wohnen mehr Raum benötigt, wir uns mehr Fläche für unser privates Umfeld wünschen oder uns mehr eigener Raum mehr Freiheit gibt ist bestimmt kein neues Phänomen, sondern begleitet uns schon eine ganze Weile. In jedem Fall ist eines klar: mehr Bauen bedeutet automatisch auch mehr Rohstoffverbrauch und dadurch mehr CO₂-Emissionen. Um diesen Hebel umzulegen, braucht es aber allem voran ein Umdenken bei jedem einzelnen, welches wir in der Bauindustrie zu wenig steuern können.

Um die Qualität des nachhaltigen Bauens und deren Potential weniger CO₂ auszustoßen zu beschreiben, müssen ohnehin mehr Faktoren betrachtet werden. Es geht dabei nämlich nicht nur um eine Steigerung der Lebensqualität für Mieter und Nutzer oder niedrige Betriebs- und Unterhaltskosten, sondern vielmehr um die Frage nach den Anforderungen für nachhaltige Bauprodukte in zertifizierten Bauprojekten. Antworten darauf können Gebäudezertifizierungssysteme wie „LEED“ (Leadership in Energy and Environmental Design) oder „BREEAM“ (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) und Prinzipien wie das „Cradle-to-Cradle-Prinzip“ bereits abbilden. Ganz nach dem Motto von Michael Baumgart (Gründer von EPEA): „Nachhaltiges Bauen ist weit mehr als nur die Berücksichtigung von Energieeffizienz, CO₂-Einsparung sowie der Einsatz erneuerbarer Energien.“ Das Ziel, welches hier verfolgt wird, ist die Funktion des Gebäudes als Rohstofflager. Dieses soll tatsächlich so errichtet werden, dass es vernetzt, autark, flexibel, kreislauffähig, gesund und energiepositiv ist. Konkret hieße das, dass die Gebäude unnutzungsfähig sind und die Materialien leicht demontierbar, sortenrein trennbar und vollständig rezyklierbar sind (Benkö 2021).

3. WAS IST NOTWENDIG, UM DIESES POTENTIAL ZU REALISIEREN?

3.1 ORGANISATORISCH

Neben der Zielsetzung, dass Gebäude durch Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Qualität und unter Einhaltung der Kosten und Termine zu planen, zu bauen und zu betreiben, kommt nun noch zusätzlich die Relevanz der CO₂-Verbräuche in Herstellung und Entsorgung der verwendeten Materialien. Vor allem bei einer Zusammenarbeit, wo verstärkt digitale Prozesse eingebracht werden ist es wichtig, eine durchdachte Strategie mit klaren Rollen und Verantwortlichkeiten aufzubauen. Fakt ist, dass sich ein erfolgreiches Projekt nur durch ein zweckgerichtetes Zusammenwirken aller Leistungen der Projektbeteiligten erzielen lässt.

Um sicherstellen zu können, dass von einer frühzeitig belastbaren Planungsqualität mit daran geknüpften Informationen zur Materialität, CO₂-Verbräuchen und diversen Verbesserungen für die Herstellung gesprochen werden kann, muss auch die Projektstruktur dementsprechend aufgebaut sein und alle beteiligten Personen müssen dasselbe Ziel vor Augen haben. Gerade in der Phase, wo neue Abwicklungsmodelle und Workflows zum Einsatz kommen, ist die Transparenz über das gesamte Projekt, sowie eine offene Fehlerkultur aller Verantwortlichen von großer Bedeutung.

3.2 TECHNISCH

Technisch lassen sich die oben beschriebenen Einflussfaktoren über die jetzigen Gebäudezertifizierungssysteme abbilden. Schon in einer frühen Entwurfsphase können damit Kennwerte ermittelt werden und erleichtern dem Bauherren Entscheidungen zu treffen. Bei der „LEED-Methode“ werden unter anderem Angaben zu den Rohstoffen und zu Rücknahmeprogrammen von Herstellern, wiedergenutzten Materialien und Recyclinganteilen bewertet (Credit 3: BPDO – Sourcing of Raw Materials), sowie Angaben zu Inhaltsstoffen und Cradle-to-Cradle beschrieben (Credit 4: Material Ingredients). Diese Methoden sollen nur einen Auszug verwendeter Systeme aufzeigen, andere Zertifizierungssysteme bewerten jedoch ähnliche oder sogar gleiche Kriterien (Building Material Scout 2019).

3.3 RECHTLICH

Die Anwendung neuer technischer Lösungen, so z.B. auch die BIM-Methodik, fordern nicht selten ein Handeln des Gesetzgebers, sodass das Rechtssystem der Umsetzung innovativer Methoden nicht „im Wege steht“. Aufgrund der besonderen wirtschaftlichen Bedeutung von öffentlichen Aufträgen im Bauwesen – im Durchschnitt sind rund 50 % der öffentlichen Vergaben Bauaufträge (vgl Bröthaler & Plank 2017) – und der im Vergleich zum privatwirtschaftlichen Bauwesen höheren gesetzlichen Reglungsdichte, werden die rechtlichen Grundzüge für die mit diesem Beitrag behandelten Zielsetzungen primär für die öffentliche Beschaffungspraxis beleuchtet.

Die öffentliche Hand, im Vergleich zur privaten, ist als Bauherr bei der Umsetzung von Bauvorhaben an das Bundesvergabegesetz 2018, BGBl I 65/2018 (BVerG 2018) gebunden. Mit dem Vergaberecht wird nicht nur die Auswahl der für ein Bauvorhaben einzusetzenden Vertragspartner an sich an einen formalen Prozess – nämlich die Durchführung eines Vergabeverfahrens – gebunden. Sondern das Vergaberecht hat auch Einfluss auf den Gegenstand der zu beschaffenden Leistung. So hat der öffentliche Bauherr auch inhaltliche Aspekte betreffend die nachgefragten Leistungen zu berücksichtigen, z.B. bei der Beachtung der Energieeffizienz oder bei der Verwendung von Lebenszykluskosten (vgl. Arztmann & Reisner 2021). Damit kann die öffentliche Hand in ihre Beschaffungspraxis auch zur Erreichung politischer Ziele eingesetzt werden.

3.3.1 Einsatz der BIM-Methodik

Im BVerG 2018 selbst finden sich keine spezifischen Regelungen zum Einsatz von BIM. In den Gesetzesmaterialien wird aber festgehalten, dass es dem öffentlichen Auftraggeber „natürlich“ freisteht, „die Nutzung von BIM vorzuschreiben [...]“ (EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 81). Damit wird klargestellt, dass der Einsatz von BIM auch von öffentlichen Auftraggebern verpflichtend vorgeschrieben werden kann. Grundsätzlich bestehen im Rahmen eines Vergabeverfahrens folgende Möglichkeiten, den Einsatz von BIM vorzuschreiben: Vorgabe von BIM als technische Spezifikation in der Leistungsbeschreibung, Vorgabe einer bestimmten BIM-Software oder eines „Leitprodukts“, Erstellung einer BIM-Datei als Teil des Leistungsumfangs oder verbindliche Zurverfügungstellung der BIM-Software durch den Auftraggeber (vgl. Heid & Deutschmann 2017). Zwar steht es dem öffentlichen Bauherrn grundsätzlich frei, sich ein Bauvorhaben nach seinen Vorstellungen zu „wünschen“ und sich dabei z.B. auch für eine technische Systemlösung zu entscheiden, die seiner Ansicht nach seinem Bedarf am besten gerecht wird. Der öffentliche Bauherr hat dabei aber in jedem Fall die Grundsätze des Vergabeverfahrens gemäß § 20 BVerG 2018 (insb. Gleichbehandlung aller Bieter, Verhältnismäßigkeit, Transparenz, Nichtdiskriminierung) zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu privaten Bauherren ist die Freiheit des öffentlichen Auftraggebers durch für BIM-Projekte „unsachliche“ und „unübliche“ Festlegungen begrenzt. Dies weitgehend unabhängig davon, welcher der oben aufgezählten Möglichkeiten der Vorschreibung von BIM er sich bedient. So darf ein öffentlicher Bauherr z.B. gemäß § 98 Abs 7 BVerG 2018 in technischen Spezifikationen nicht auf Marken, Patente, Typen etc. verweisen, wenn dadurch bestimmte Unternehmer oder bestimmte Produkte begünstigt oder ausgeschlossen werden. Da es für die Umsetzung von BIM-Projekten verschiedene Softwarelösungen am Markt gibt, ist z.B. die Vorgabe einer konkreten BIM-Software in den technischen Spezifikationen aus vergaberechtlicher Sicht in der Regel unzulässig.

Im Ergebnis ist der Einsatz der BIM-Methodik auch bei öffentlichen Bauvorhaben zulässig, sofern die Grundsätze des Vergabeverfahrens gemäß § 20 BVerG 2018 eingehalten werden.

3.3.2 Berücksichtigung von Umweltaspekten

Auf den „bloßen“ Einsatz der BIM-Methodik abzustellen, wäre im Hinblick auf das Ziel der Reduktion von CO₂ insbesondere bei der Produktion, dem Rückbau und der Entsorgung verwendeter Materialien, zu kurz gegriffen. Vielmehr soll BIM für die Umsetzung dieses Ziels als Mittel zum Zweck dienen, um bestimmte Umweltziele zu erreichen. Es sind daher jedenfalls auch die Möglichkeit der Berücksichtigung von Umweltaspekten im Vergabeverfahren zu erörtern.

Privaten Bauherrn steht es dabei vollkommen frei, Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitskriterien für die Umsetzung eines Bauvorhabens zu fordern. Bei öffentlichen Beschaffungsvorhaben handelt es sich bei der Berücksichtigung von Umweltaspekten allerdings um sogenannte „vergabefremde“ Aspekte. Erstmals mit dem BVerG 2018 lässt das Vergaberecht die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in Vergabeverfahren ausdrücklich zu. In § 20 Abs 5 BVerG 2018 ist vorgesehen, dass im Vergabeverfahren „auf die Umweltgerechtigkeit der Leistung Bedacht zu nehmen“ ist (§ 20 Abs 5 BVerG 2018). Gleichzeitig nennt das Gesetz auch beispielhaft berücksichtigungswürdige ökologische Aspekte wie Energieeffizienz, Materialeffizienz oder Abfall- und Emissionsvermeidung. Die Gesetzesmaterialien stellen dazu allerdings klar, dass eine umweltgerechte Beschaffung in erster Linie an der korrekten

Festlegung des Auftragsgegenstandes anzuknüpfen hat. Hierzu bedarf es jedenfalls konkrete Festlegungen hinsichtlich entsprechender umweltbezogener Anforderungen an die zu beschaffende Leistung (z.B. spezifische Anforderungen an die Baumaterialien, Recyclingquoten).

Eine Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte in öffentlichen Beschaffungen kann durch die Berechnung von Lebenszykluskosten erfolgen. Kosten, die durch externe Effekte der Umweltbelastung entstehen, die mit der Leistung während ihres Lebenszyklus in Verbindung stehen, können in einem Kostenmodell zur Ermittlung des besten Preis-Leistungs-Verhältnisses eines Angebots herangezogen werden. Voraussetzung dafür ist, dass der Wert der externen Effekte in Geld bestimmt und überprüft werden kann. Das anzuwendende Kostenmodell ist vom Auftraggeber bekanntzugeben und muss z.B. auf objektiv nachprüfbar und nichtdiskriminierenden Kriterien beruhen und allen interessierten Unternehmen zugänglich sein. Weiters sind vom Auftraggeber die von den Bieter bereitzustellenden Daten bekanntzugeben. Die Vergabepraxis zeigt sich in diesem Zusammenhang noch eher zurückhaltend, es ist aber davon auszugehen, dass dieses Kostenverständnis im Hinblick auf die angestrebte Ökologisierung des gesamten Wirtschaftssystems zunehmend an Bedeutung gewinnen wird (vgl. Heid & Hofbauer 2021). Bereits bestehende Praxis-Leitfäden geben bereits eine erste Unterstützung hinsichtlich der vergaberechtlichen Umsetzung von Lebenszykluskostenmodellen (Europäische Kommission 2016).

Denkbar wäre auch, dass die CO₂-(Gesamt-)Emissionen eines Bauprojekts als Zuschlagskriterium im Rahmen der Bestbieterermittlung bewertet werden. Voraussetzung dafür ist – wie bei der Anwendung von Lebenszykluskostenmodellen – dass der Auftraggeber Vorgaben festlegt, die zu vergleichbaren Angeboten der Bieter führen. Die CO₂-(Gesamt-)Emissionen könnten dabei über ein BIM-Modell ermittelt werden.

4. USE CASES UND ERSTE ANWENDUNGEN ZUR LÖSUNG DES PROBLEMS

4.1 INTEGRATION DER GRAUEN ENERGIE UND WEITERER ÖKOBILANZDATEN IN DIE BIM-METHODIK

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit werden bereits unterschiedliche Anwendungsfälle in der digitalen Welt betrachtet und umgesetzt.

Wie bereits beschrieben gibt es Gebäudezertifizierungen in den einzelnen Ländern, die der Bauherr von seinem Bauprojekt einfordern kann. Auch in Österreich wurden solche Ansätze und Anforderungen gestellt, wobei schon in der Planungsphase auf die LCA-Berechnung (Life Cycle Assessment), den nachhaltigen Beschaffungsplan für die eingesetzten Holzprodukte, sowie ein Konzept zur Umsetzung der Optimierung des Materialeinsatzes, der homogenen Baustoffauswahl und der Beachtung der Rückbaubarkeit Wert gelegt wurde. BuildingSMART entwickelt dazu einen Use-Case, um die Integration der grauen Energie und die Anbindung von Ökobilanzdaten zu standardisieren. Der Anwendungsfall beschäftigt sich mit der Ökobilanzierung von Gebäuden und Bauteilen für die Optimierung der grauen Energie bereits ab der frühen Planungsphase (buildingSMART 2019).

4.2 CO₂-EINSPARUNG DURCH VORFERTIGUNG

Der Bereich der Gebäudeausstattung hat sich zum Ziel gesetzt, dass bereits in der Planungsphase bedacht werden muss, welche Ressourcen auf der Baustelle zum Einsatz kommen und mit welchen CO₂-Emissionen diese verbunden sind. Ein erster Schritt in die richtige Richtung wurde schon von buildingSMART international in einem Anwendungsfall festgehalten. Dieser beschreibt unter anderem Anforderungen an die Vorfertigung von Sanitär- und Heizungsleitungen, wobei der Kern dieser Methode das sogenannte „z-Mass“ und ein damit verbundenes, einheitliches Messverfahren ist. Dieses seit langer Zeit etablierte Verfahren wird nun neu beschrieben, sodass es mittels BIM-Methodik in digitalen Bauwerksmodellen eingesetzt werden kann. Für die Modellierung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung kommt geometrischer Content von Herstellern zum Einsatz. Ziel des Use-Cases ist es, sämtliche Rohrleitung vorgefertigt auf das Bauprojekt anliefern zu lassen, wodurch eine markante

Effizienzsteigerung im Montageprozess möglich und die Arbeit des Installateurs auf der Baustelle deutlich erleichtert wird.

Die größten Hebel hierbei: Steigerung der Produktivität von Gebäudetechnikern auf der Baustelle, Verkürzung der Montagezeit, weniger Installationsfehler und weniger oder keine Restmaterialien auf den Baustellen. Bei bereits abgewickelten Projekten in DE oder CH konnte man dadurch bis zu 30 % an Ressourcen (Personalzeiten, Montagezeiten und Material) sparen und erzielte gleichzeitig eine Genauigkeit von über 95 % der gelieferten Bauteile (buildingSMART 2021).

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Durch die aktuelle Auseinandersetzung mit der Thematik in vielen Bereichen merkt man, dass es Fortschritte in der Entwicklung gibt, welche in neuen organisatorischen, technischen und vergaberechtlichen Modellen umgesetzt werden.

Anhand des aufgezeigten Beispiels wird deutlich, wie wichtig die Betrachtung und Vorausplanung eines Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus ist. Aktuell lassen sich Erkenntnisse zur CO₂-Bilanz von Bauteilen ohne technische Hilfsmittel nur sehr schwer und verbunden mit hohem Zeitaufwand ermitteln. Durch den Einsatz von Building Information Modeling, wo jedem Bauteil im Modell die aktuellen Ökobilanzdaten zugewiesen sind und im Idealfall sogar alternativen oder Verbesserungsvorschläge aufgezeigt werden, kann ein enormer Fortschritt im Baugewerbe erzielt werden. Durch BIM könnten neben vielen anderen Vorteilen auch große Mengen CO₂ eingespart und der Einsatz CO₂-reduzierender Materialien zum Standard werden.

LITERATUR

- Arztmann F.J. & Reiser H. (2021) Green Public Procurement – Nachhaltigkeit in der Vergabe, Nachhaltigkeitsrecht 2021/1.
- Benkö L. (2021), Nachhaltigkeit weiter gedacht - Zu nachhaltigem Bauen gehört auch Recycling., UBM Magazin, Union-Baumaterialien-Gesellschaft, <https://www.ubm-development.com/magazin/cradle-to-cradle/>
- Bröthaler J. & Plank L. (2017) Methodische Grundlagen und empirische Ermittlung des gesamten Beschaffungsvolumens und öffentlicher Auftragsvergaben, Studie der Technischen Universität Wien, Department für Raumplanung, Fachbereich Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik (Johann Bröthaler, Leonhard Plank) im Auftrag des ANKÖ – Auftragnehmerkataster Österreich.
- Building Material Scout (2019), DGNB, LEED & BREEAM – Welche Kriterien werden bewertet? <https://building-material-scout.com/nachhaltiges-bauen/dgnb-leed-breeam-welche-kriterien-werden-bewertet/>
- BuildingSMART CH, Angelico, V., Gerber, D., Hoffeller, T., Lauzikas, J., Paczkowski, S., Wüst, S., (2021), Use Case Vorfertigung von Rohrleitungen, <https://ucm.buildingsmart.org/use-case-details/1682/de>
- BuildingSMART CH, Naneva, A., Schmid, H., Sinzel, B. (2019), Use Case zur Integration der grauen Energie und weiterer Ökobilanzdaten in die BIM-Methodik
- EASAC (European Academies' Science Advisory Council) (2021), Policy Report 43, Decarbonisation of buildings: for climate, health and jobs
- Europäische Kommission, Umweltorientierte Beschaffung! Ein Handbuch für ein umweltorientiertes öffentliches Beschaffungswesen (2016) (abgefragt am 20.9.2021) (20.9.2021).
- Heid S. & Deutschmann D. (2017) Vergaberechtliche Umsetzung von BIM-Projekten im BVerG 2017, In: Gary, G. [Hrsg.] BIM – Digitale Revolution und ihre Grenzen.
- Heid S. & Hofbauer B. (2021) Die Nachhaltigkeit in der öffentlichen Vergabe: Das Green Public Procurement, RPA 2021/6.

- Hamilton I. & Rapf O. (2020) Executive Summary of the 2020 Global Status Report for Buildings and Construction
- Schmid H. (2019) buildingSMART Switzerland, Integration der grauen Energie und weiterer Ökobilanzdaten in die BIM-Methodik
- Lambertz M., Wimmer R., Theißen S., Höper J., Meins-Becker A., Zibell M. (2019) Ökobilanzierung und BIM im Nachhaltigen Bauen. Endbericht. Zukunft Bau
- Tuschinski M. (2020) EPBD-UPDATE Neue EU-Gebäuderichtlinie setzt Energie-Standards bis 2030
- Zechmeister A. (2021) Klimaschutzbericht 2021, Report REP-0776, Umweltbundesamt GmbH, Wien, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

KONTAKTDATEN

Nina Königshofer
Wipplingerstraße 12/2
1010 Wien
Email: n.koenigshofer@moo-con.com

Session 4b

Städtische Überhitzung

Lowtech Bürogebäude – Wesentliche Beeinflussungsgrößen

Lorber / ALLPLAN GmbH / AT

Hengel / AEE INTEC / AT

Cool-down Güssing - innovative Ansätze zur passiven Kühlung von Bestandsgebäuden

Tomaschitz, Stöller / Forschung Burgenland GmbH / AT

Doczekal / Güssing Energy Technologies GmbH / AT

Pratter / 4ward Energy Research GmbH / AT

Tröpferlbad 2.0: Mikroklimatische und soziale Monitoring-Ergebnisse von zwei Coolspots in Wien

Knoll, Renkin / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT

Schnepf, Vollmann / Green4Cities GmbH / AT

Lowtech Bürogebäude – Wesentliche Beeinflussungsgrößen

M. Lorber

ALLPLAN GmbH, Wien, Austria

F. Hengel

AEE – INSTITUTE FOR SUSTAINABLE TECHNOLOGIES, Gleisdorf, Austria

Die vorliegende Arbeit stützt sich wesentlich auf die Masterarbeit „Energie- und Optimierungsanalyse eines State of the Art Bürogebäudes am Fallbeispiel LOWERGETIKUM“ von Lorber (2021). Analysen, Ergebnisse sowie zugehörige Untersuchungsmaßnahmen wurden direkt entnommen. Dies beinhaltet ebenfalls auszugsweise Textpassagen und Grafiken. Zugunsten einer verbesserten Lesbarkeit werden in den folgenden Kapiteln keine wiederholten Referenzen zu dieser Arbeit angeführt. Alle Auslegungen, vertiefende Informationen und Details können aus der Masterarbeit Lorber (2021) entnommen werden.

ABSTRACT: On the basis of an investigation of a modern office building, its energy demand is analyzed and evaluated in order to demonstrate further potentials by extending and adapting the basic model. This is done by mapping within a dynamic simulation environment. The building itself can be classified as a low-tech building and represents an advantageous basis in this context, since extensive factors can be illuminated by relatively simple measures. The adjustments to the building model, the generation and delivery systems as well as its control logic are carried out in individual phases in order to map them in a matrix and to narrow them down to the most efficient variants by means of correlation analysis. All simulation runs are realized dynamically and year-round within the chosen tool IDA ICE. Additional optimizations show further potentials in order to finally determine the best case variant with regard to energy efficiency and without loss of comfort.

This paper is not only an evaluation of the selected object in its original planning and a presentation of possible optimizations as well as alternative parameters and components. It is also intended to show trend-setting concepts and strategies regarding the planning and the construction of highly efficient buildings.

1. EINLEITUNG

Moderne, als State of the Art (SOTA) zu beurteilende, Gebäude weisen teilweise bereits eine sehr hohe Effizienz in ihrer Energiebilanz auf. Durch den Einsatz modernster Technologien, Synergienutzung von Energieflüssen, einem intelligenten Regelungsmanagement und der Integration einer Eigenstromherstellung sind Bürogebäude in der Lage, die Anforderung von Plus-Energiegebäuden zu erfüllen. Das in Wien situierte Plus-Energie-Bürohochhaus der TU Wien zählt zu diesen und wurde 2014 übergeben.

Um derartige Energiebedarfswerte zu erzielen, scheint die Anwendung von Simulationen sinnvoll. Die Relevanz sowie die Qualität von Gebäudesimulationen kann von Studien bestätigt werden. Beermann et al. (2018) führten im Zuge einer Gebäudebewertung für das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie eine Untersuchung durch, die den Energiebedarf (Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf, Kühlbedarf, Stromverbrauch), durch Auswertung zuvor berechneter Daten mit den tatsächlichen Werten vergleicht. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von einem Jahr an in Betrieb befindlichen Gebäuden durchgeführt. Ausgewählt wurden unterschiedliche

Nutzungen und umfassten unter anderem Bürogebäude, ein Hotel, ein Pflege- sowie ein Studentenheim – sowohl Neubauten als auch Sanierungen. Als Grundlage der Berechnungswerte dienten die ermittelten Daten laut Energieausweis der OIB RL6 (2019). Laut Bericht konnten bei den meisten Gebäuden gute Übereinstimmungen ermittelt werden. So wurden bei einer Übereinstimmung von Planung und Umsetzung bzw. späterer Nutzung nur geringe Abweichungen festgestellt. Der reale Verbrauch lag dahingehend bei Bedarfswerten von 33 bis 76 kWh/(m²a) um 0,6 bis 7,6 kWh/(m²a) höher resp. um 9,1 bis 12,1 kWh/(m²a) niedriger als der Bedarf laut Planung.

Nach Hajare & Elwakil (2020) kann diese Analyse bestätigt werden. Im Zuge einer Life-Cycle Cost Analysis wurden die Energiebedarfswerte eines Wohngebäudes mittels eines Simulationstools simuliert und mit den realen Werten verglichen. Die Genauigkeit lag hier bei 90 %.

Longo et al. (2019) untermauern die notwendige Relevanz von Simulationen. So seien diese aufgrund der stetig anspruchsvoller werdenden Energiebedarfsvorgaben im Gebäudesektor seitens der EU oder fortgeschrittener Staaten notwendig, um die Vorgaben einhalten zu können. Mit Fokus auf Nearly Zero Energy Buildings wurden verschiedene Tools verglichen. So sind die Programme TRNSYS und EnergyPlus am weitesten verbreitet, jedoch werden speziell in Nordeuropa IDA ICE bevorzugt eingesetzt.

Die Realisierung hocheffizienter und nachhaltiger Gebäudeprojekte erfordert eine qualitative Erfassung der Energiebilanzen vor der Errichtung. Es kann festgehalten werden, dass diese durch Simulationsanalyse im Vorfeld ermittelbar sind und bei ausreichender Detaillierung des Modells in einer geringen Diskrepanz zwischen Simulation und erwartetem realem Objekt vorliegen. Zu entsprechenden Simulationsumgebungen hinsichtlich der Gebäudesimulation zählen u.a. IDA ICE, TRNSYS und EnergyPlus. Eine möglichst exakte digitale Abbildung des Gebäudes und der eingesetzten Technik – auch wenn es sich nur um ein Low-Tech-Gebäude handelt – dessen Bewertung sowie die Entwicklung einer optimalen Variante führt final zu der effektivsten und auch umsetzbaren Lösung.

2. METHODIK

Für die simulationstechnischen Betrachtungen wurde das reale Gebäude Lowergetikum am Standort Pinkafeld anhand eines Industry Foundation Classes (ifc) Modell vorbereitet und in die Simulationssoftware IDA ICE von EQUA Solution AB geladen, weiter modelliert und bewertet. Zur Plausibilisierung bzw. Überprüfung des Modells diente der Energieausweis bzw. wurde das Wärmepumpenmodell mit realen Daten kalibriert. Die Vorstudien zeigten, dass die Modellierung mittels der Software eine ausreichende Genauigkeit erfüllte und dadurch die hier simulierten Ergebnisse stützen. Berechnungen erfolgten dynamisch, Zeitschrittweiten innerhalb der Simulationsumgebung sind bei einem Maximum von 10 Minuten definiert, um auch schnelle Änderungen von z.B. Lüftungsanlagen identifizieren zu können.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen die Modellierungsannahmen für das Gebäude als auch für die Anlage und die Vereinfachungen, die für die Simulation getroffen wurden. Als Randbedingungen wurde der reale Standort Pinkafeld und die dazugehörigen Wetterdaten mit einem Test Referenz Year (TRY) verwendet.

2.1 MODELLBILDUNG

Als Grundlage für die Gebäudeabbildung der Basisvariante diente das zur Verfügung gestellte ifcModell sowie der bereitgestellte Energieausweis. Das Gebäude wurde vollständig innerhalb der Simulationsumgebung nachgebildet und ist in Abb. 1 dargestellt. Als definierte Parameter hinsichtlich Ausrichtung, Standort, Wetter usw. gelten die örtlichen Gegebenheiten des Bauplatzes in Pinkafeld.

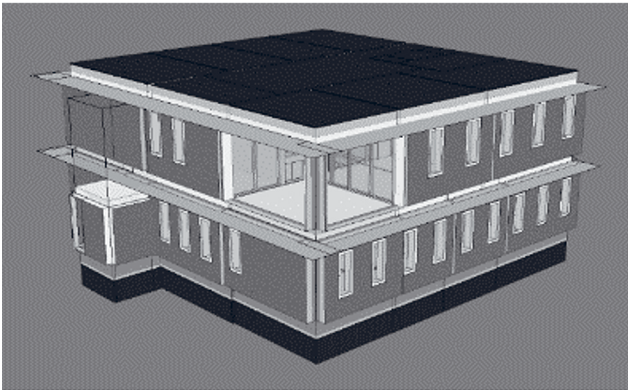


Abb. 1: IDA ICE Modell des Lowergetikum

Abb. 2 zeigt die Raumbezeichnungen des Grundmodells, welches sich nach den Architekturvorgaben orientieren. Die darüberliegenden Zonen im Obergeschoß über den Zonen 1 bis 4 wurden ebenfalls als Bereiche mit Arbeitsplätzen deklariert, da diese im Allgemeinen auch Büroflächen wären und nur bei dem Lowergetikum Spezialanwendungen zum Tragen kommen. Entsprechend liegt eine allgemeine Büronutzung für das Gesamtgebäude vor und ermöglicht eine repräsentative Abschätzung und Analyse des Objektes. Definition über Anzahl der Arbeitsplätze beruht auf möglicher maximaler Belegung nach AStV (2021).

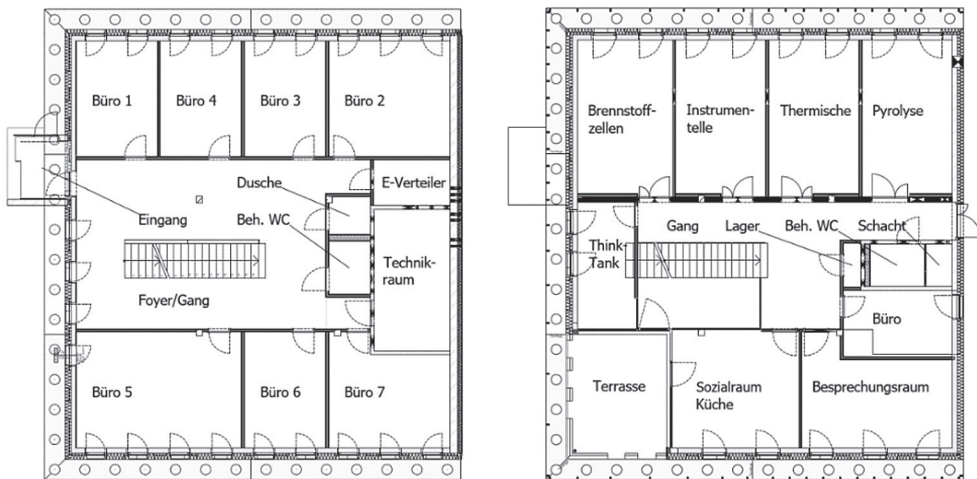


Abb. 2: Grundriss des Gebäudes; links: Erdgeschoß, rechts: Obergeschoß

Das Basismodell inkl. der definierten Systemtemperaturen wird durch Abb. 3 veranschaulicht. Dies beinhaltet die Wassertemperaturen von Vor- und Rücklauf zu den Abgabesystemen bzw. Wärmetauschern der RLT Anlage, die konstante Zulufttemperatur der Lüftung sowie die Hauptkomponenten des Systems.

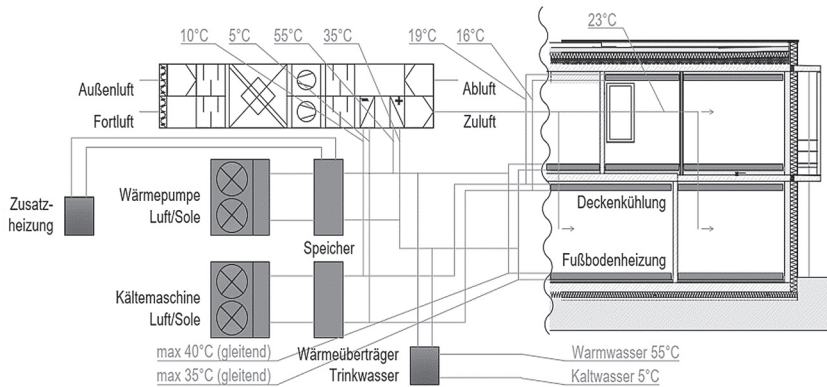


Abb. 3: Basismodell mit der Anlage, Gebäude und den Systemtemperaturen für Heizung, Kühlung und Lüftung

2.2 PARAMETERÄNDERUNGEN

Für die Variantenentwicklung waren einerseits Modifikationen des Gebäudes sowie andererseits Anpassungen und Erweiterungen der Komponenten der Haustechnik vorgesehen. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Adaptierungen des Gebäudes
 - Verschattungen (horizontaler Überstand mit 80 cm)
 - Dämmstärke (von 24 cm bis 34 cm)
 - Fensteranteile – Reduktion auf Mindestanforderung lt. Arbeitsstättenverordnung (AStV 2021) (von 6,5 % auf 4,1 %)
 - Fensteröffnungsstrategien zur Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs
- Anpassung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA)
 - Heiz- und Kühlsystem Wärmepumpe, Änderung der Quelle (Luft, Flächenkollektoren, Erdsonden)
 - Free-Cooling
 - Versorgungsstrategien (Vorlauf- und Rücklauftemperaturen von 55 °C bis 35 °C des Erhitzers der RLT Anlage, Absenkbetriebe zwischen 18:00 und 06:00 Uhr um 6 K für Heizbetrieb sowie 5 K für den Kühlbetrieb)
 - Luftwechsel (konstant, CO₂- und CO₂- Feuchte- Kombinationssteuerung)
 - Licht (Leuchtmittel und Beleuchtungsstärke, Arbeitsplatzorientierung), Lichtausbeute von 100 bis 149 lm/W und Optimierung der Büroausleuchtung – Arbeitsplätze und Verkehrsflächen – von flächendeckend 500 lx auf durchschnittlich 300 lx
 - Integration einer PV Anlage bei einer Größe von 30 m² sowie einem Systemwirkungsgrad von 14 %

2.3 MODELLVEREINFACHUNG UND ANNAHMEN

Folgende Definitionen bzw. Vereinfachungen wurden für die Sensitivitätsanalysen bzw. der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen getroffen:

- RLT Anlage mit einem Rückgewinnungsgrad gleich 81 %
- Fußbodenheizung und Kühldecke als Abgabesysteme, d.h. die Fußbodenheizung dient nicht der Kühlung
- Kältemaschine und Wärmepumpe als Bereitstellungssysteme für Kühlung, Heizung und Warmwasser (im Basismodell als Luft/Sole Systeme)

- Wärme- und Kältespeicher – einfaches Modell mit idealer Schichtung und Shunt
- Elektrische Zusatzheizung für Spitzenlastabdeckungen – ideal geregelt
- Arbeitsplatzbedarfswerte nach SIA2024 (2015)
- Mindestbeleuchtungsstärke und Bürobesetzung nach AStV (2021)
- Normativ abweichende thermische Konditionierungsvorgaben mit einem Heizsollwert von 22 °C und Kühlsollwert von 25 °C
- Grundwassertemperatur und Erdreich sind als konstant anzusehen

3. SENSITIVITÄTSANALYSEN GEBÄUDE

Energiebedarfswerte sind im Folgenden als thermische Energien erfasst, Endenergiebedarfswerte beziehen sich auf elektrische Energie.

3.1 HORIZONTALE VERSCHATTUNG UND BEDARFSFENSTER-ÖFFNUNG

Es zeigen sich wesentliche Auswirkungen auf die Energiebilanzen hinsichtlich des Einsatzes einer horizontalen Verschattung, sowie einer manuellen Fensteröffnung bei Begünstigung des definierten Raumsollwertes. Der Einsatz einer horizontalen Verschattung über den Fenstern mit einer durchgehenden Tiefe von 80 cm reduziert den thermischen Kühlbedarf des Gebäudes um 22 % (vgl. Abb. 4). Bei zusätzlicher Bedarfsfensteröffnung (Innentemperatur überschreitet Außentemperatur) lässt sich eine Gesamtreduktion der jährlichen thermischen Kühlenergie von 41 % ermitteln. Die Reduktion des elektrischen Gesamtendenergiebedarfs des Gebäudes beträgt hierbei 11 %, ungeachtet des erhöhten elektrischen Lichtenergiebedarfs. Auswirkungen auf den thermischen Energiebedarf der Heizung (ohne Warmwasser) sind in allen Varianten marginal. Der elektrische Endenergiebedarf des Gebäudes berücksichtigt Arbeitsplätze, Beleuchtung, Warmwassererzeugung, Heizung, Kühlung, Hilfsmittel der TGA (Pumpen, Ventilatoren, usw.) sowie allgemeine Betriebsmittel (Küche, Allgemeinbereiche – z.B. Drucker).

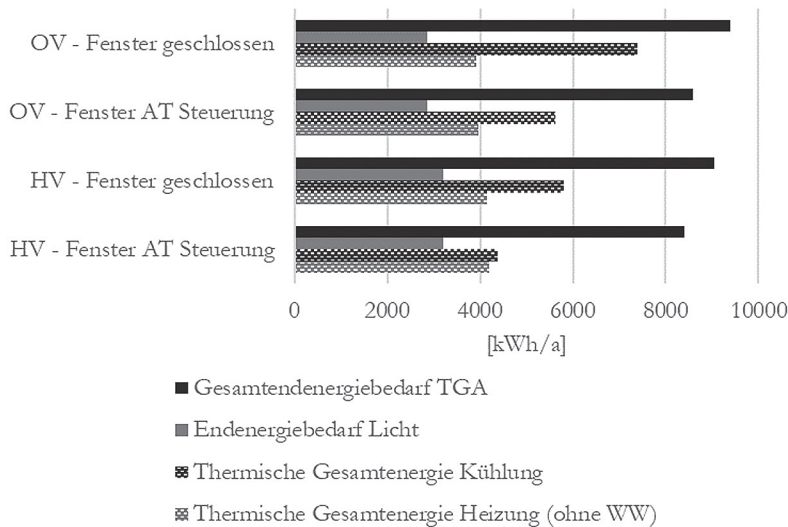


Abb. 4: Energiebedarfswerte des Gebäudes ohne Verschattung (OV), bei Einsatz einer horizontalen Verschattung (HV), bedarfsgerechter Fensteröffnung (AT Steuerung) sowie permanent geschlossenen Fenstern

Als Fazit kann gesehen werden, dass die baulichen Maßnahmen in Form einer horizontalen Verschattung bei den angenommenen Gegebenheiten sehr starke Auswirkung auf den Kühlenergiebedarf haben, dies aber schon in der Bauplanungsphase berücksichtigt werden sollten.

3.2 DÄMMUNG, REDUKTION DER FENSTERANTEILE, IMPLEMENTIERUNG EINER VERTIKALEN VERSCHATTUNG

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt, deren Ergebnisse dem Basismodell gegenübergestellt und in Abb. 5 veranschaulicht sind:

- A - Basismodell mit einem U-Wert gleich $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und horizontaler Verschattung
- B - Erhöhung der Dämmung um 10 cm zur Variante A
- C - Integration einer außenliegenden vertikalen Verschattung (Rollo mit Transmissionskoeffizient gleich 0,05, Reflexionskoeffizient gleich 0,3 – Variante blickdicht) zum Basismodell
- D - Reduktion der Fensteranteile auf das Minimum laut AStV (2021)
- E - Kombination der Varianten B, C und D

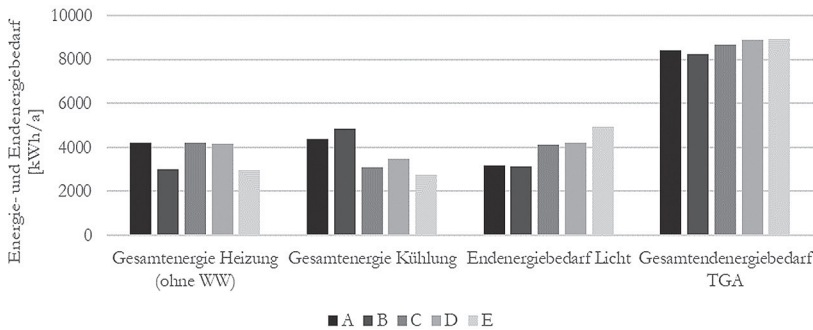


Abb. 5: Gegenüberstellung relevanter Energiekennzahlen der Gebäudeoptimierungsmodelle

Es zeigen sich direkte Abhängigkeiten der Energiebilanzen. Modelle B und E weisen aufgrund der Dämmerhöhung einen verringerten Heizenergiebedarf auf. Variante C und E zeigen die signifikantesten Reduktionen bei Betrachtung der aufzuwendenden Kühlenergie. Durch die Reduktion der Fensteranteile in Kombination mit einer externen Verschattung ist für die Variante E der höchste Lichtenergiebedarf zu erwarten. In der Gesamtendenergiebilanz TGA liegen Abweichungen von beinahe 10 % im Bedarf vor. Speziell der zusätzliche Energiebedarf durch Aktivierung des Lichtes, um den verringerten natürlichen Lichteinfall ausgleichen zu können, ist ausschlaggebend dafür, dass das System E in dieser Ausführung nicht das effizienteste System darstellt.

Trotz der getätigten kombinierten Optimierungen für Variante E zeigt sich ein höherer Endenergiebedarf, da der Einfluss des künstlichen Lichts überwiegt.

4. SENSITIVITÄTSANALYSE TGA

4.1 WÄRME- UND KÄLTBEREITSTELLUNG UND SYSTEM-TEMPERATUREN

Im Zuge der TGA Optimierungsmaßnahmen wurden folgende Varianten verglichen:

- 1 - Basismodell mit Wärmepumpe und Kältemaschine als Luft/Sole Systeme
- 2 - Wärmepumpe und Kältemaschine mit Wärme- und Kälterückgewinnung (Erweiterung um einen zusätzlichen Wärmetauscher und Vernetzung von Wärmepumpe und Kältemaschine) sowie Free-Cooling als Luft/Sole System

- 3 - Wärmepumpe und Kältemaschine mit Wärme- und Kälterückgewinnung sowie Free-Cooling als Sole/Sole Systeme durch Einsatz eines Flächenkollektors
- 4 - Wärmepumpe und Kältemaschine mit Wärme- und Kälterückgewinnung sowie Free-Cooling als Sole/Sole Systeme durch Einsatz von Erdsonden
- 5 - Wärmepumpe und Kältemaschine mit Wärme- und Kälterückgewinnung sowie Free-Cooling als Sole/Sole Systeme durch Einsatz von Erdsonden bei abgetrennter WW- Bereitstellung durch ein elektrisches Heizelement
- a - Basismodell mit ganzjährigen Sollwerten für Heiz- und Kühlbetrieb
- b - Nacht und Wochenendabsenkbetriebe der Sollwerte
- c - Anpassung der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen durch Einsatz vergrößerter Wärmetauscher der RLTA Anlage
- d - Kombination der Varianten b und c

Jegliche sich aus der Kombination von A-E (bauliche Maßnahmen), 1-5 (anlagenspezifische Maßnahmen) sowie a-d (regelungstechnische Maßnahmen) ergebenden Varianten wurden untersucht und gegenübergestellt. Die daraus resultierenden elektrischen Endenergiebedarfswerte des Gebäudes zeigen die direkten Abhängigkeiten der Gebäude als auch der TGA Variationen. Tab. 1 zeigt die wichtigsten Varianten mit den höchsten Einsparungspotentialen.

Tab. 1: Jährlicher Endenergiebedarf der TGA in kWh

Variante	A	B	C	D	E
1_a	8401,8	8228,3	8660,2	8901,3	8930,4
2_d	7509,2	7088,1	8146,8	8271,5	8329,1
4_a	6759,6	6453,5	7580,3	7694,5	8087,0
4_b	6727,5	6329,4	7582,1	7667,2	7972,4
4_d	6184,8	5762,0	7089,2	7155,2	7467,5
5_d	6786,7	6438,0	7687,1	7773,2	8150,5

Bei Einsatz des vollständig optimierten Gebäudemodells E sind zwar Reduktionen von aufzuwendender Heiz- und Kühlenergie zu verzeichnen, jedoch zulasten eines erhöhten Beleuchtungsenergiebedarfs. Folgend ist ein Anstieg des Endenergiebedarfs der Gesamt-TGA abzuleiten, da der zusätzliche Einsatz der künstlichen Beleuchtung den verringerten Endenergieaufwand der Wärmepumpe, sowie der Kältemaschine nicht kompensiert. Es zeigt sich, dass Gebäudevariante B die effizienteste darstellt, im Besonderen in Kombination mit einem Erdsondenfeld (der Einsatz eines Flachkollektors ergibt ähnliche Ergebnisse) sowie einer intelligenten Regelungslogik und Anpassung der Systemtemperaturen durch Variante d.

4.2 LUFTWECHSEL, BELEUCHTUNG UND PV ANLAGE

Final wurden der Luftwechsel sowie die Beleuchtung optimiert und eine PV Anlage integriert. Die hierfür herangezogenen Variantenvergleiche umfassten:

- Basismodell mit konstantem Luftwechsel
- Y - CO₂ Steuerung der Lüftung
- Z - CO₂ Steuerung der Lüftung mit übergeordneter Entfeuchtungsregelung
- Licht - Beleuchtungsoptimierung durch Einsatz moderner LED- Technologie (149 lm/W) sowie arbeitsplatzorientierter Ausleuchtung
- PV - Einsatz einer PV Anlage

Der Vergleich zeigt eindeutige Einsparungspotentiale hinsichtlich des zu erwartenden Endenergiebedarfs. Im direkten Vergleich wesentlicher Optimierungsmodelle zu der Ausgangsvariante können Reduktionen von 46 % bis 60 % erzielt werden. Die anteilige PV Eigenabdeckung ist grafisch in Abb. 6 ebenfalls dargestellt, jedoch nicht als Verbrauchswert anzusehen. Vielmehr soll hier das Potential dieser Maßnahme visuell hervorgehoben werden. Bezugnehmend dazu ist im Basismodell A_1_a ein jährlicher Endenergiebedarf von etwa 13.900 kWh/a zu erwarten und steht einem Bedarf von ca. 5.600 kWh/a der Variante B_4_d_Y_Licht_PV gegenüber. Bedingt durch eine nicht vorgesehene Entfeuchtung (Kühlung ausschließlich durch Free-Cooling) der Zuluft sowie der deutlichen Reduktion des Beleuchtungsbedarfs (vergrößerte transparente Bauteile) stellt diese Variante zugleich die effizienteste dar.

Bei allen Varianten wurden die Behaglichkeitskriterien erfüllt, bzw. jene die die Behaglichkeitskriterien nicht erfüllen konnten, wurden von der Simulation ausgeschlossen.

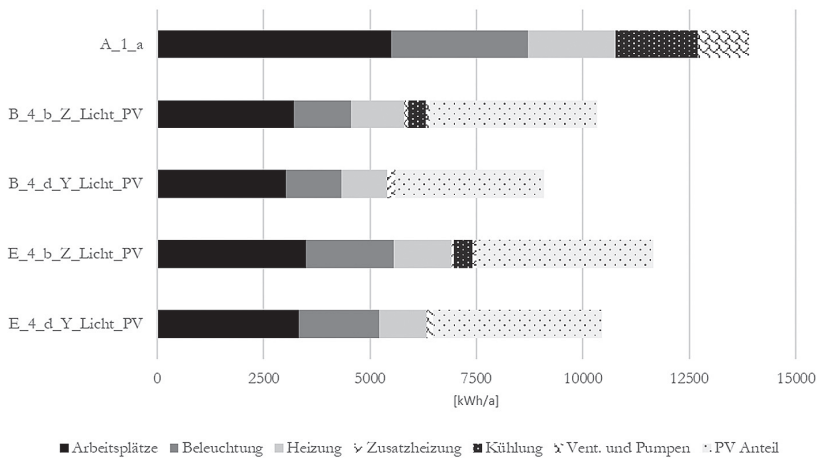


Abb. 6: Endenergiebedarf der Bürogebäudevarianten

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie zeigt ein repräsentatives Low-Tech Bürogebäude am Standort Pinkafeld, dass durch Variantenstudien simulationstechnisch mit der Software IDA ICE analysiert wurde. Dabei wurden bauliche Optimierungen sowie Optimierungen hinsichtlich der Anlage und der Regelung durchgeführt und bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass hohe und qualitative Dämmungen aufgrund deutlicher U-Wert-Reduktionen anzustreben sind. Dies ermöglicht geringste Außeneinwirkungen auf das Gebäudeinnere und resultiert in einer verbesserten Temperaturkontinuität der Zonen. Transparente Bauteile sollten nicht auf das mögliche Minimum verringert werden. Vielmehr ist ein ausreichender Anteil anzustreben, der sowohl künstliche Beleuchtungsmaßnahmen auf ein Minimum reduziert als auch die ausgleichenden Kühlmaßnahmen zum Schutz vor Überwärmungen eingrenzt. Dahingehend zeigt sich, dass horizontale Verschattungen gegenüber vertikalen zu bevorzugen sind, und durch einfache bauliche Maßnahmen viel Energie gespart werden kann.

Im Sinne einer zukunftsorientierten und nachhaltigen Systemwahl wird der Einsatz von Flächenabgabesystemen für Heizung und Kühlung empfohlen. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften sind diese als Fußbodenheizung sowie als Deckenkühlung auszuführen. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz einer Wärmepumpe mit Erdreichnutzung aufgrund eines verbesserten COP-Verhaltens (hohe

Quell bei geringen Senkentemperaturen) anzustreben. Die Warmwasserbereitstellung ist ebenfalls mit der Wärmepumpe zu koppeln, da diese gegenüber einer elektrischen Bereitstellung die „energetischere“ Variante darstellt (nicht aber aus ökonomischer Sicht). Erdkollektoren (oder Erdsonden) sind in einem Solesystem mit Wärmepumpe und Kältemaschine zu vernetzen, um eine Erdreichregeneration (wie unter diesen Annahmen) zu gewährleisten. Hierbei sollte jedoch auf den Grundwasserspiegel und allgemein auf das Erdreich geachtet werden (z.B. gute Wärmeleitfähigkeit). Die Kältemaschine dient nur zur Abdeckung der Spitzenlasten, Grundlasten sind über Free-Cooling abzuführen. Der Einsatz einer RLT Anlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung, einer CO₂ geregelten Zu- und Abluftregelung und vergrößerten Wärmeüberträgern für Heizung und Kühlung ist zugunsten einer optimalen Performance (Senkung der Systemtemperaturen) sinnvoll. Um den Strombedarf deutlich reduzieren zu können, ist die Errichtung einer Eigenstromversorgung in Form eines PV Systems anzuraten, diese jedoch auf den Eigenbedarf zu optimieren.

LITERATUR

- AStV (2021) Arbeitsstättenverordnung gesamte Fassung aus RIS abgerufen am 1.10.2021 (RIS - Arbeitsstättenverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 01.10.2021 (bka.gv.at))
- Beermann M.; Sauper E. & Sauer I. (2018) Messtechnische Untersuchung von energieeffizienten Demonstrationsgebäuden, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien, Österreich, S. 9-38
- Hajare A. & Elwakil E. (2020) Integration of life cycle cost analysis and energy simulation for building energy-efficient strategies assessment, Sustainable Cities and Society, vol. 61, S. 1-17
- Longo S., Montana F. & Riva Sanseverino E. (2019) A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations, Sustainable Cities and Society 45, 87-104 [10.1016/j.scs.2018.11.027].
- Lorber M. (2021) Energie- und Optimierungsanalyse eines State of the Art Bürogebäudes am Fallbeispiel LOWERGETIKUM, Masterarbeit an der FH-Burgenland, Standort Pinkafeld
- OIB RL 6 (2019) Richtlinien des österreichischen Instituts für Bautechnik, OIB Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, S. 4, 11
- SIA2024 (2015) Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik SIA 2024:2015 Bauwesen Ersetzt SIA 2024:2006 sowie Teile von SIA 382/1:2006 Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, <https://www.sia.ch>

KONTAKTDATEN:

Manuel Lorber
Mollardgasse 20/4/4
1060 Wien
Email: manuel.lorber@gmx.net

Cool-down Güssing - innovative Ansätze zur passiven Kühlung von Bestandsgebäuden

I.V. Tomaschitz, J. Stöller

Forschung Burgenland, Eisenstadt, Österreich

C. Doczekal

Güssing Energy Technologies GmbH, Güssing, Österreich

R. Pratter

Award Energy Research GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: The city of Güssing, like many other cities, is strongly affected by summer overheating. For years, the municipality has been trying to reduce the significantly increasing need for cooling, whereby the climate protection approach pursued in Güssing for decades should be taken into account, especially for this cooling purpose. In the building stock subsequent cooling measures, which are not based on conventional retrofit air conditioning units, are difficult to achieve. Retrofitting of climate-protection-oriented and innovative cooling systems in existing buildings requires not only new technologies, but also new and above all holistic. We need Climate-friendly and integrative solutions, which can also be operated and financed economically at the same time. A total of seven demo objects with different characters are considered. These are public buildings, businesses and single-family houses. In order to find out the problems, wishes, user behavior and the subjective comfort of the employees and residents, surveys were carried out in each demo property. As in the survey phase, stakeholder involvement is based on the design thinking process (Schröder 2017). After that the heat problem became clear. The possible cooling technologies are defined and compared in order to install the most suitable for the respective type of use. Measures such as reducing internal loads and adapting user behavior can already reduce the temperature. Based on the initial situation and the findings, a cooling concept will be developed or finalized for each demonstration object over the next few months. The aim of the project is to actually apply the developed cooling concepts in at least six of the nine demonstration objects.

1. EINLEITUNG

Die Stadtgemeinde Güssing, welche im südlichen Teil des Burgenlandes (Österreich) liegt, ist stark von sommerlicher Überhitzung betroffen. Hitze, besonders in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit, belastet den menschlichen Körper enorm. Für die Gesundheit kann es dadurch zu verschiedenen direkten und indirekten negativen Auswirkungen kommen. Beispielfhaft führen hohe Temperaturen schnell zu Dehydrierung oder niedrigem Blutdruck, was wiederum zu Kreislaufbeschwerden und Hitzeerschöpfung führen kann. Aufgrund der Dehydrierung steigt durch das zähflüssige Blut das Risiko für Thrombosen, Herzinfarkt und Schlaganfälle. Indirekte Folgen sind unter anderem durch Medikamente herabgesetzte körperliche und geistige Belastungsgrenzen. Durch Klimawandelanpassungsmaßnahmen können diese negativen Auswirkungen stark reduziert oder sogar komplett verhindert werden (APCC 2018).

Im Gebäudebestand sind nachträgliche Kühl-Maßnahmen, welche nicht auf Basis herkömmlicher, aktiver Retrofit-Klimageräte beruhen, schwierig zu realisieren. Obgleich eine passive Kühlung aus energietechnischer und ökologischer Sicht die attraktivere Variante darstellt, werden aktuell vor allem bei Bestandsgebäuden vermehrt aktive Kühlsysteme verbaut. Gründe hierfür sind, dass diese einfach nachgerüstet werden können, höhere und individuell regelbare Kühlleistungen erzielen sowie meist mit niedrigeren Anschaffungskosten verbunden sind. Damit nicht ausschließlich ineffiziente, rein strom-

betriebene Kühltechnologien im Bestand forciert werden, sind klimaschonende und integrative Lösungen notwendig, welche gleichzeitig auch wirtschaftlich betrieben und finanziert werden können. Für ein Nachrüsten von klimaschonenden und innovativen Kühlsystemen bei bestehenden Gebäuden bedarf es nicht nur neuer Technologien, sondern auch neuer und vor allem holistischer Ansätze.

Ziel des Forschungsprojekts Cool-down Güssing ist daher die Entwicklung und Umsetzung von klimaschonenden Kühlkonzepten für den Gebäudebestand, welche gleichzeitig an die Bedürfnisse der Nutzer*innen angepasst sind. Durch die Auswahl unterschiedlicher Demonstrationsobjekte und Nutzungsformen (öffentliche Gebäude, Betriebe, Einfamilienhäuser) wird zudem gewährleistet, dass Kühlkonzepte für unterschiedlichste Anforderungen und Ausgangssituationen entwickelt werden.

2. METHODIK & TECHNOLOGIEN

Um die Nutzer*innen einzubinden wurde nach dem Design Thinking Prozess (Schröder 2017) vorgegangen. Als erster Schritt fanden eine Bedarfserhebung und Problemanalyse der Überhitzung in den Demonstrationsobjekten statt. Hierzu wurde ein umfassendes Stakeholder Portfolio durchgeführt. Anschließend wurden die Nutzer*innen aktiv durch Beobachtungen und qualitative Interviews eingebunden. Es wurden mündliche und schriftliche Befragungen in den Demonstrationsobjekten durchgeführt.

Auf Basis dieser Bedarfserhebungen wurde für jedes Demonstrationsobjekt ein Nutzer*innen-Anforderungsprofil abgeleitet. Dieses Nutzer*innenprofil zeigt Problemfelder, Bedürfnisse und Verbesserungsvorschläge aus Sicht der Hauptnutzer*innen im Gebäude auf und dient damit als Basis für die Entwicklung der technischen Kühlkonzepte. Ergänzend zu den durchgeführten Behaglichkeitsmessungen, wurde in einigen Demonstrationsobjekten zusätzlich die subjektive Behaglichkeit als Ergänzung zu den Messdaten erhoben. Um einen Vorher- Nachher-Vergleich zu erzielen, wird dieser Prozess nach der Umsetzung der Kühlmaßnahmen wiederholt. Damit können die Auswirkungen der gesetzten Maßnahmen in den Demonstrationsobjekten evaluiert werden.

Basierend auf dem Nutzer*innen-Anforderungsprofil wurden verschiedene Kühltechnologien bzw. Technologien zur Reduktion des Wärmeeintrags erhoben und hinsichtlich deren Eignung für den Einsatz in Bestandgebäuden beurteilt. Die Maßnahmen wurden dabei in folgende Kategorien unterteilt:

- (Nacht)lüftung: Reicht von (nachrüstbaren) automatischen Fensteröffnern, über dezentrale Lüftungsgeräte für einzelne Räume bis hin zu zentralen Lüftungssystemen für gesamte Gebäude. Auch bereits vorhandene Technologien wie Braundrauchentlüftungsanlagen können genutzt werden. Diese Maßnahmen zeichnen sich durch ihren geringen Energiebedarf und den je nach Ausführung überschaubaren baulichen Aufwand (vor allem bei der automatischen Fensterlüftung) aus. Die Kühlleistung ist ohne weitere Maßnahmen allerdings mit der Außenlufttemperatur beschränkt. Eine Kopplung mit Smart Home Applikationen bieten die Möglichkeit diese Art der Lüftung mit einer zusätzlichen Intelligenz, bzw. Teilautomation zu versehen.
- Verminderung des Wärmeeintrags: Darunter wurden sämtliche Möglichkeiten zur Verschattung von Glasflächen, wie beispielsweise Sonnenschutzfolien, Außenjalousien oder andere bauliche Maßnahmen zusammengefasst. Dabei handelt es sich zwar nicht um Kühlmaßnahmen im eigentlichen Sinn, durch die Reduktion des Wärmeeintrags kann allerdings erreicht werden, dass der Kühlbedarf und damit die benötigte Kühlleistung deutlich reduziert wird. In weiterer Folge kann dadurch der Einsatz von Kühltechnologien mit geringer bzw. limitierter Kühlleistung erleichtert und der Einsatz von aktiven Kühlgeräten vermieden werden.
- Reduktion innerer Lasten: Vor allem in Betriebsgebäuden und Produktionshallen kommt es oft zu wesentlichen Wärmeeinträgen durch innere Lasten die von einer Vielzahl an Computer, unisolierten Rohren oder diversen Produktionsprozessen stammen können. Für jedes Demonstrationsobjekt wird dahingehend eine Potentialanalyse durchgeführt, um diese Lasten zu erkennen und zu reduzieren.

- Gebäudebegrünung: Eine begrünte Fassade kann einen aktiven Sonnenschutz bieten sowie durch die Erzeugung von Verdunstungskälte zur Verbesserung des Mikroklimas innerhalb des Gebäudes und im unmittelbaren Gebäudeumfeld beitragen. Dabei kann zwischen mehreren Arten der Fassadenbegrünung (Bodengebunden, Troggebunden, Wandgebunden), sowie zwischen einer intensiven und einer extensiven Dachbegrünung unterschieden werden.
- Wärmetauscher: In dieser Kategorie werden verschiedene Möglichkeiten der Kühlung mittels Wärmetauscher zusammengefasst. Ist beispielsweise eine Erdwärmepumpe vorhanden, kann der Solekreislauf im Sommer zur Kühlung genutzt werden, ohne dass die Wärmepumpe aktiviert werden muss (free-cooling). Darüber hinaus können eigene luft- oder wasserdurchströmte Wärmetauscher installiert werden. Luftdurchströmte Wärmetauscher leiten die angesaugte Luft über ein im Erdreich verlegtes Rohr um diese vorzukühlen. Solche Wärmetauscher können mit verschiedenen Lüftungsgeräten gekoppelt werden, um deren Kühlleistung zu erhöhen. Wasserdurchströmte Erdreichwärmetauscher verfolgen ein ähnliches Konzept, mit dem Unterschied, dass in diesem Fall die Zuluft nicht direkt über den Wärmetauscher angesaugt wird, sondern von einem entkoppelten Solekreislauf vorgekühlt wird. Die Wärmeabgabe kann über ein Lüftungssystem, über eine Fußbodenkühlung oder mittels Bauteilaktivierung erfolgen, wobei letztere schwierig im Bestandsbau zu realisieren ist.
- Latentwärmespeicher: Bezeichnen Speicher welche einen Phasenwechsel (fest/flüssig) in einem für die technische Nutzung geeigneten (schmalen) Temperaturbereich vollziehen und dabei große Mengen an Wärmeenergie latent zu speichern vermögen. Latentwärmespeicher oder PCM-Systeme sind somit zur Wärme- bzw. Kältespeicherung vor allem bei kleinen verfügbaren Temperaturunterschieden hervorragend geeignet, so dass sie eine wichtige Rolle im Bereich der Gebäudeklimatisierung einnehmen können. PCM-Systeme kommen vor allem in Bürogebäuden zu Einsatz um den Zeitpunkt der Erwärmung nach hinten zu verschieben. In den Nachtstunden können diese entweder natürlich über die kühle Nachtluft oder aktiv über einen Wärmetauscher regeneriert werden.

Nur wenn der Einsatz von passiven Kühltechnologien nicht (wirtschaftlich) möglich ist bzw. die benötigte Kühlleistung damit nicht erreicht werden kann, wird der Einsatz von aktiven Kühltechnologien geprüft. In diesem Fall sollen diese möglichst mit erneuerbarem Strom versorgt werden. Vor allem Photovoltaikanlagen (PV) eignen sich aufgrund ihrer Gleichzeitigkeit mit dem auftretenden Kühlbedarf sehr gut zur Versorgung von Kühlgeräten. Außerdem wird im Rahmen des Projektes auch eine sogenannte Kühl-EEG, also eine Erneuerbare-Energie-Gemeinschaft zu Kühlzwecken, untersucht. Diese soll Stakeholder ohne Photovoltaikanlagen die Möglichkeit bieten erneuerbaren Strom zu vorteilhaften Konditionen lokal zu beziehen, um damit ihr Kühlgeräte zu betreiben. Weiters bietet sich dadurch die Möglichkeit zusätzlich zur Verfügung stehenden PV-Strom innerhalb der EEG auch für weitere Einsatzzwecke zu nutzen.

Die Beurteilung, welche Technologien und Methoden für welches Demonstrationsobjekt am besten geeignet sind erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse, der folgende Kriterien zugrunde gelegt wurden: ökologische Aspekte (Energiebedarf, Einsatz bedenklicher Materialien, etc.), technische Aspekte (technische Aufwand bei der Installation der jeweiligen Maßnahme), Herstellungskosten, Betriebskosten, Kühleffekt (max. Kühlleistung, Limitationen, etc.), Einfluss auf Gebäude und Umgebung (Schallbelastung, etc.) und soziale Aspekte (z.B. unterschiedliches Empfinden eines wahrnehmbaren kühlen Luftstroms). Der Gewichtung der Kategorien erfolgt für jede Gebäudekategorie individuell. So nehmen beispielsweise die finanziellen Aspekte bei öffentlichen Gebäuden einen besonders hohen Stellenwert ein. Darüber hinaus können mehrere Maßnahmen miteinander kombiniert werden, um ein optimales Ergebnis zu erreichen. Die intelligente Vernetzung mehrerer Technologien, beispielsweise über Smart-Home Anwendungen, sowie die Bewusstseinsbildung für richtiges Kühlverhalten stehen ebenfalls im Fokus des Projekts. Für Zweiteres kommen unter anderem sogenannte „Easy Energy Saver“ zum Einsatz, die im Rahmen das Smart Cities Demo-Projekts „Empower Citizens“ entwickelt wurden (Rabensteiner 2019).

Um für die Bevölkerung einen Rückzugsort vor der sommerlichen Überhitzung zu schaffen, wird die Einrichtung eines „öffentlichen Kühlspots“, auf einem öffentlichen Platz geprüft. Dort können verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Mikroklimas (Verschattung, Sprühnebel, etc.) durchgeführt werden. Ziel ist es die städtische Lebensqualität zu fördern und das örtliche Zusammentreffen auch an Hitzetagen zu ermöglichen. Vor allem sollen aber vulnerable Gruppen (z.B. ältere Menschen) geschützt werden. Dabei ist es wichtig, die Bevölkerung einzubinden, um den richtigen Standort und die passenden Möglichkeiten für einen solchen Kühlspot zu definieren.

3. AUSGANGSLAGE DER DEMONSTRATIONSOBJEKTE

Als Demonstrationsobjekte für Cool-down Güssing sind drei Betriebsgebäude (BG), drei Wohngebäude (WG) sowie drei öffentliche Gebäude (ÖG) vorgesehen. Durch die Auswahl unterschiedlicher Gebäudetypen mit unterschiedlichen Ausgangssituationen soll gewährleistet werden, dass die entwickelten Kühlkonzepte ein breites Einsatzspektrum aufweisen und zukünftig in einer Vielzahl von weiteren Bestandgebäuden in Güssing und darüber hinaus einsetzbar sind. Die wesentlichen Eckpunkte der einzelnen Demonstrationsobjekte sind in den folgenden Unterkapiteln kurz angeführt.

3.1 VULCOLOR NATURFARBEN GMBH (BG)

Das Betriebsgebäude des Lebensmittelfarbenproduzenten am Hauptstandort in Güssing hat einige südseitig ausgerichtete Büroräumlichkeiten. Während im Bürotrakt, im Labor und im Zubau bereits Klimaanlage (Multisplitgeräte) vorhanden sind, sind die Produktionshallen zurzeit gänzlich ungekühlt. Eine Abkühlung in der Produktion in der Nacht findet nur in geringem Ausmaß statt. Das Raumklima in der Produktionshalle wird als stark verbesserungswürdig bezeichnet, bedingt durch hohe innere und äußere Lasten. Im August 2020 ergaben sich Raumtemperaturen im Obergeschoß von über 35 °C. Selbst ein teilweises Öffnen der Tore zu Lüftungszwecken in den Abend oder Morgenstunden ist aus mikrobiologischer Sicht problematisch. Der größte Kühlbedarf des Demonstrationsobjektes liegt nach der Befragung der Mitarbeiter*innen in der Produktion. Zusätzlich ergab die Umfrage, dass die Arbeitsleistung durch die Hitze von manchen Mitarbeiter*innen minimiert wird. Es muss also ein Weg gefunden werden, um die Produktion zu kühlen bzw. den Wärmeeintrag zu reduzieren, ohne die Qualität der Produkte zu beeinflussen und dennoch dem Cool-down Güssing Ansatz gerecht zu werden.

3.2 GUTTOMAT SEKTIONALTORE GMBH (BG)

Die Firma Guttomat erzeugt am Standort Güssing Sektionaltore für häusliche- und gewerbliche Anwendungen. Die Büroräumlichkeiten sind bereits mit Multisplitgeräten klimatisiert. Die Produktionshallen wurden in mehreren Ausbaustufen errichtet. Derzeit wird einschichtig produziert, wobei der Arbeitsbeginn, bedingt durch die sommerliche Überhitzung, auf Wunsch der Mitarbeiter*innen, auf 06:00 Uhr vorverlegt wurde. Außerdem werden die Raumtemperaturen, durch innere Lasten der Lackieranlage, weiter erhöht. Brandrauchentlüftungen mit elektrischer Bedienung, samt Regensensor, werden bereits teilweise zum Lüften genutzt. Teilweise sind auch kleine Tischventilatoren für die Arbeitsplätze vorhanden. Ein optimales Arbeitsklima kann mit diesen Maßnahmen allerdings bei weitem nicht erreicht werden, da alle Befragten angaben, wegen der Hitze an einer reduzierten Leistungsfähigkeit zu leiden. Deshalb sollen im Projekt weitere Maßnahmen untersucht und gesetzt werden.

3.3 AUTO DOCZEKAL GMBH (BG)

Das Autohaus mit Hauptsitz in Güssing weist Büroräumlichkeiten auf, die an Schauräume mit großer Fensterfassade angeschlossen sind. Durch kürzlich installierte Multisplitgeräte kann das Arbeitsklima in diesen Räumlichkeiten auf einem halbwegs angenehmen Niveau gehalten werden. Die sommerliche Überhitzung ist insbesondere in der Werkstatt (max. 31,5 °C im Juli 2021) und in der Spenglerei zu spüren. Die Tore können während den Betriebszeiten zwar zu Lüftungszwecken geöffnet werden bewirken

aber nur eine geringfügige Verbesserung. Verschattungseinrichtungen sind keine vorhanden. Außerdem ist ein hoher Wärmeeintrag über das Dach, bedingt durch den Altbau, zu verzeichnen. Ein Großteil der Befragten gab an, dass ihre Arbeitsleistung durch die Hitze reduziert wird (Abb.1).

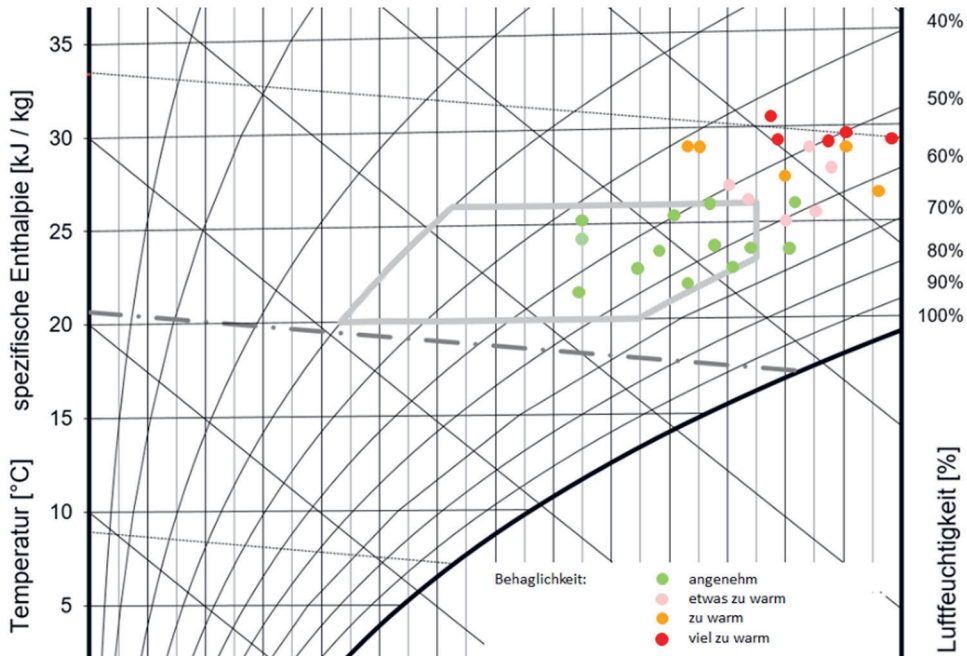


Abb. 1: Auswertung Nutzer*innen Behaglichkeit (Mollier-Diagramm) der Werkstatt Auto Doczekal im Juli und August 2021

3.4 AUSGANGSLAGE DER WOHNGEBÄUDE (WG)

Die Wohnstruktur in Güssing besteht vorwiegend aus mehrgeschossigen Wohnbauten und Einfamilienhäusern. Im Zuge des Projekts wurde daher sowohl Einfamilienhäuser als auch eine Wohnhausanlage als Demonstrator gewählt. Es sollen innovative Kühlkonzepte gefunden werden, die insbesondere die Schwerpunkte Smart-Home, automatisierte Beschattung und intelligente Belüftung unter Einbezug von erneuerbaren Energieträgern zur Deckung des dennoch benötigten Strombedarfs adressieren.

3.5 KINDERGARTEN GÜSSING (ÖG)

Die Raumtemperaturen im Kindergarten sind bereits in der Vorsommersaison, als auch nach den Sommerferien (Sommerbetreuung wird angeboten) sehr hoch. Gesucht sind daher alternative Lösungen zur Reduktion der Raumtemperatur und Verbesserung des Raumklimas. Die Kühltechnologie muss die sensible Gesundheit der Kinder berücksichtigen (keine Zugluft) und einen nachhaltigen Gedanken verfolgen. Die Akzeptanz der Nutzer*innen (Pädagog*innen, Kinder, Eltern) ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss.

Im Erdgeschoss (EG) sind innenliegende Verschattungsmöglichkeiten (Rollo) vorhanden, im Obergeschoss (OG) außenliegende Jalousien. Die maximale gemessene Raumtemperatur im EG betrug im August 2020 26,9 °C. Trotz innenliegender Verschattung wird das Erdgeschoss im Sommer von den Nutzer*innen, verglichen mit dem OG, als angenehmer empfunden. Die Auswertung zeigt, dass die Raumtemperaturen im EG (Ziegelwände) deutlich weniger stark schwanken, als die Temperaturen im

OG (Holzriegelwände). Die thermische Behaglichkeit in der Kinderkrippe (Westseite) im OG wird von den Nutzer*innen als besonders unangenehm empfunden. Hier betrug die maximale gemessene Raumtemperatur im Juli 2021 32 °C, bzw. im Schlafräum der Kinderkrippe 28,9 °C.

3.6 SCHULE (ÖG)

Das BORG und die ECOLE HLW Güssing sind in einem großen Gebäudekomplex untergebracht. Ca. 70 Lehrer*innen und 450 Schüler*innen sind die Hauptnutzer*innen des Gebäudes. Bereits im Juni zeigt sich mit maximalen Raumtemperaturen zwischen 32,3 °C und 33,8 °C das Überhitzungsproblem von 4 Klassen im Obergeschoß (noch während des Schulbetriebs).

Außenliegende Raffstores sind am gesamten Gebäude vorhanden, können den enormen Hitzeeintrag aber nicht verhindern. An der Nord-Westseite der Schule ist bedingt durch eine zeitweise Holzstaubbelastung vom Nachbarbargrundstück ein Öffnen der Fenster nur eingeschränkt möglich (je nach Windrichtung). Außerdem sind die finanziellen Möglichkeiten, um in geeignete Kühlösungen zu investieren, äußerst begrenzt. Ziel ist es daher eine nachhaltige und vor allem kostengünstige Lösung zu finden, die dennoch in der Lage ist, eine signifikante Verbesserung herbeizuführen.

3.7 FEUERWEHRHAUS GÜSSING

Das Feuerwehrhaus Güssing ist bereits über 40 Jahre alt, der Wärmeeintrag von außen ist hoch und es gibt keine ausreichende Beschattung. In den nächsten Jahren ist eine umfassende Sanierung des Feuerwehrhauses geplant. In Zuge dessen soll durch Cool-down Güssing der Einbau von innovativen Kühlsystemen evaluiert werden.

4. BISHERIGE ERKENNTNISSE

In diesem Kapitel sind die bisherigen Erkenntnisse für zwei ausgewählte Demonstrationsobjekte angeführt:

Auto Doczekal: Die großen, südseitigen Fensterflächen der Werkstatt, sowie das thermisch unsanierte Dach, bewirken einen raschen Temperaturanstieg, mit nur sehr geringer zeitlicher Phasenverschiebung zur Außentemperatur. Die nächtliche Abkühlung der Werkstatt betrug im August 2020 meist zwischen 3 K und 5 K. Das tägliche Öffnen der Tore um 06:30 Uhr führte zu etwa 2 K geringere Raumtemperaturen. Hier lässt sich das Potential für eine Nachtlüftung erkennen, wenn die Werkstatt bereits ab den Abendstunden ausreichend durchlüftet werden könnte. Dem entgegen steht jedoch, dass das Tor während der Betriebszeiten im Sommer meist offen steht (Wärmeeintrag von außen). Nach Rücksprache mit den Nutzer*innen könnte das Tor wie im Winter nur bei Bedarf geöffnet werden, das eine Nachtlüftung befürworten würde. Als erste Umsetzungsmaßnahme wurden Sonnenschutzfolien an der Glasfassade der Werkstatt angebracht. Die Nutzer*innen berichten über eine deutliche Verbesserung der Behaglichkeit am Arbeitsplatz gleich neben den Fensterflächen. Eine deutliche Reduktion der Raumtemperatur wurde, bedingt durch das offene Tor, jedoch nicht festgestellt. Eine thermische Sanierung des Daches, bzw. der Fensterflächen wäre jedoch nur bei einer umfassenden Generalsanierung der Werkstatt angedacht.

Schule (BORG): Die hohen Raumtemperaturen (z.B. zwischen 27 °C und 30 °C Mitte September 2020, bei außen max. 28 °C) sind einerseits durch die kaum vorhandene Abkühlung der Klassen in der Nacht (keine Nachtlüftung), sowie durch die falsche Benützung des Sonnenschutzes und Fensterlüftung durch die Nutzer*innen möglich. Es wurden verschiedene Varianten zur Reduktion der sommerlichen Überhitzung (Sonnenschutzfolien, Nachtlüftung, dezentrale Lüftungsgeräte, Klimageräte, etc.) simuliert. Hierbei geht für ein östliches Klassenzimmer hervor, dass bei konsequenter Nachtlüftung (4-facher Luftwechsel) zwischen 20 und 6 Uhr die Raumtemperatur (heißester Tag im Juni) um 5,4 K reduziert werden kann. Ohne Nachtlüftung sinkt die Lufttemperatur in den Klassenräumen lediglich um 1,4 K.

Basierend auf diesen Simulationsergebnissen soll für einige Klassenräume eine Automatische (Nacht-)lüftung mittels nachträglich einbaubarer Fensteröffner getestet werden. Diese Fensteröffner sind mit einer zentralen Intelligenz gekoppelt, die bewirkt, dass die Fenster abhängig von den aktuellen Bedingungen (Außenlufttemperatur, Innenlufttemperatur, CO₂-Konzentration, Niederschlag, etc.) geöffnet bzw. geschlossen werden. Außerdem muss die Windgeschwindigkeit erfasst werden, um ein Eindringen von Holzstaub vom Nachbargrundstück (siehe Kapitel 3.6) in die Klassenräume zu verhindern. Um das Eindringen von Tieren wie Vögel oder Fledermäuse zu verhindern (Auslösen der Alarmanlage) sollen grobmaschige Schutzgitter installiert werden, die nur geringe Auswirkungen auf die erzielbare Luftwechselzahl haben.

Generelle Erkenntnisse:

- In vielen Fällen kann durch eine geeignete Reduktion des Wärmeeintrags der äußeren und inneren Lasten der Kühlbedarf deutlich reduziert werden.
- Das Nutzer*innen-Verhalten sollte erhoben und die Nutzer*innen ggf. geschult werden (z.B. bleiben derzeit Fenster/Tore an Sommertagen oft geöffnet)
- Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit reduziert die Behaglichkeit, kann mit passiver Kühlung jedoch nur eingeschränkt verbessert werden.
- Das Potential an Nachtlüftung ist groß, hängt stark von bautechnischen Rahmenbedingungen ab und kann meist als manuelle, oder (teil)automatisierte Lösung implementiert werden.
- Die Wirtschaftlichkeit des Kühlkonzepts darf keinesfalls vernachlässigt werden. Vor allem öffentlichen Gebäuden wie Schulen stehen nur sehr begrenzte Budgetmittel zur Verfügung, sodass entsprechende „Low-Cost-Lösungen“ gefunden werden müssen.

5. AUSBLICK

Aufbauend auf der erhobenen Ausgangslage und den bereits beschriebenen Erkenntnissen wird in den nächsten Monaten für jedes Demonstrationsobjekt ein Kühlkonzept entwickelt bzw. dieses finalisiert. Dazu werden weitere Variantenrechnungen, Vergleiche, Bewertungen durchgeführt sowie Vorbereitungsmaßnahmen für die Umsetzungsphase getroffen. Ziel des Projektes ist es, die erarbeiteten Kühlkonzepte in zumindest sechs der neun Demonstrationsobjekte auch tatsächlich zur Anwendung zu bringen. Um die (positiven) Effekte der umgesetzten Maßnahmen zu bewerten wird ein umfassendes Monitoring durchgeführt, das von einer laufenden Stakeholdereinbindung begleitet wird. Die Stakeholdereinbindung erfolgt, wie auch in der Erhebungsphase, in Anlehnung an den Design Thinking Prozess (Schröder 2017). Kerninhalt des Design Thinking Ansatzes ist eine regelmäßige Nutzer*inneneinbindung zu definierten Zeitpunkten. Ziel ist es, die neu entwickelten Technologien bestmöglich an die Bedürfnisse der Nutzer*innen anzupassen.

Durch die Auswahl unterschiedlicher Gebäudetypen mit unterschiedlichen Ausgangssituationen soll gewährleistet werden, dass die entwickelten Kühlkonzepte ein breites Einsatzspektrum aufweisen und zukünftig in einer Vielzahl von weiteren Bestandsgebäuden in Güssing und darüber hinaus einsetzbar sind.

LITERATUR

- APCC - Austrian Panel on Climate Change. (2018). Pre-Print: Österreichischer Special Report Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18). Verfügbar unter: <http://sr18.ccca.ac.at/downloads/> [26.11.2018]
- Schröder, A. (2017). Design Thinking: Innovationen für die Gesellschaft: Neue Wege und Methoden zur Entfaltung des Potentials sozialer Innovationen, Systemedia, Würzburg
- Rabensteiner, M., Pratter R., Gnam L. (2019). Selbstlernendes Empfehlungssystem Steigerung der Behaglichkeit, e-nova 2019, Pinkafeld, verfügbar unter: <https://people.fh-burgenland.at/handle/20.500.11790/1370>

KONTAKTDATEN:

Ina Verena Tomaschitz

Campus 1

7000 Eisenstadt

Email: ina.tomaschitz@forschung-burgenland.at

Tröpferlbad 2.0: Mikroklimatische und soziale Monitoring-Ergebnisse von zwei Coolspots in Wien

B. Knoll, A. Renkin

Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH, Wien, Österreich

D. Schnepf, T. Vollmann

Green4Cities GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: A healthy, cool urban climate is one of the most essential commons of our present society. Therefore, the project goal of “Troepferlbad 2.0” is the creation of so-called Coolspots, i.e., multifunctional cooling oases in the urban open space. The project title refers to the establishment of the first public bathes in Vienna, named “Troepferlbad”. As a welfare institution, these were a blessing to public health and a contemporary response to the problems of the urban population of the late 19th century, providing vulnerable groups with urgently needed infrastructure and promoting social cohesion. The Coolspot-network shall imitate the social, architectural, and functional success of the Troepferlbad 2.0 network, giving to the today’s urban population a common relief in the hot seasons, specifically for vulnerable groups and to those who do not have the luxury of own balconies, gardens or other private green space. At the same time, the architectural design shall respond to the individual needs in the local space fostering social cohesion.

The Coolspots demonstrate the multifunctional benefits of co-creatively planned, self-organized and decentralized implementation of urban Nature-based solutions (NBS) at ground sealed public spaces. The overall aim is to create scalable, modular, changeable, cooling-optimized urban open spaces (Coolspots) with a high quality of stay. Different participation and co-creation measures were tested in order to integrate various vulnerable local groups (senior citizens, homeless people, etc.) and their interests to the design of the Coolspots.

The Troepferlbad 2.0 project directly meets the ecologic, social, economic and cultural pillars of sustainable development. Based on the ecologic pillar through fostering urban NBS in heavily degraded urban environment, social, economic and cultural dimensions are met via co-creational planning-methods and adapted local urban design.

The results from the project shall enable the creation of a Coolspot network throughout Vienna and European cities, based on the publication of the modules and principles and practitioner-handbooks for implementation.

The R&D project Troepferlbad 2.0 is a cooperative project between different partners under the funding program of the Austrian climate and Energy Fund (Project number: 875166). Via experimentation and co-creation, the Troepferlbad 2.0 method could be developed and demonstrated at two Demosites in two different Viennese districts (Schlingermarkt and Esterházyark).

1. EINLEITUNG

Das Projekt „Tröpferlbad 2.0. Technische, planerische und finanzielle Umsetzung eines Coolspotnetzwerks – mit besonderem Fokus auf vulnerable Gruppen“ ist ein österreichisches Forschungsprojekt, das vom Klima- und Energiefonds (<https://www.klimafonds.gv.at/>) im Programm Smart Cities (<https://smartcities.at/projects/coolspotnetzwerk-fuer-vulnerable-gruppen/>) gefördert wird. Die Abwicklung erfolgt über die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG (Projektnummer: 875166). Das Projektkonsortium besteht aus folgenden Organisationen: Green4Cities GmbH (Konsortialführung), Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH, ÖGUT – Österreichische Gesellschaft für Um-

welt und Technik, Die Treiber e.U., ROCKETS Holding GmbH, Magistratsabteilung 18 der Stadt Wien (sowie MA 20, MA 22, MA 25 und KBI), Urban Innovation Vienna GmbH und Wien Energie GmbH. (<https://www.troepferbad.at/>)

Der Titel des Projekts „Tröpferbad 2.0“ ist an einen gleichnamigen Wiener Volksmund-Begriff angelehnt. Volksbäder wurden in der Gründerzeit und im Roten Wien aufgrund ihres oft spärlichen Wasserflusses „Tröpferbad“ genannt. Die Bäder waren für viele Wiener Arbeiterinnen und Arbeiter jahrzehntelang die einzige Möglichkeit zu Körperreinigung und daher ein wichtiger Faktor für die Volksgesundheit. Entsprechend diesem Hintergrund will das Projekt „Tröpferbad 2.0“ einen ähnlich positiven Effekt erzielen und die Schaffung von kühlungsoptimierten Stadtfreiräumen anstoßen, um einen aktiven Beitrag gegen die steigenden Temperaturen in unseren Städten und für eine klimawandelangepasste Stadtentwicklung (Rößler 2015) zu leisten.

Zwischen 2019 und 2020 wurden zwei Demo-Coolspots an zwei verschiedenen Standorten entwickelt und gebaut, nämlich am Schlingerkmarkt im 21. Wiener Gemeindebezirk und im Esterházyark (vor dem Haus des Meeres) im 6. Wiener Gemeindebezirk. Dabei wurden mikroklimatische und soziale Aspekte mitgedacht und berücksichtigt. Das Forschungsprojekt „Tröpferbad 2.0“ bietet den Rahmen und die Möglichkeiten das Konzept von Coolspots an diesen zwei Demo-Standorten zu monitoren und zu evaluieren. So können Erkenntnisse gewonnen werden über das bestmögliche Design von Coolspots und über die tatsächliche Wirksamkeit – sowohl mikroklimatisch als auch für unterschiedliche Nutzerinnen und Nutzer. Zudem werden im Forschungsprojekt auch Finanzierungsmodelle entwickelt, um die Verbreitung von Coolspots in Wien und anderen Städten – im Sinne eines Coolspot-Netzwerkes – zu ermöglichen. Als Ergebnis des Forschungsprojekts werden im Frühling 2022 Planungshandbücher zu den Themen Design und Technik, Planung und Errichtung, Grünpflege und Wartung, Partizipation sowie Finanzierung der Coolspots erstellt und publiziert.

2. WAS IST EIN „COOLSPOT“?

„Coolspot“ ist ein englischer Begriff und bedeutet übersetzt so viel wie „kühle Stelle“ oder „kühler Ort/Platz“. Der Name wurde gewählt, weil die „Coolspots“ genau das sein sollen: kühle und coole Orte, an zentralen asphaltierten Plätzen in der Stadt, die mit ihrem Kühleffekt zum Aufenthalt an vor allem heißen Sommertagen einladen und für alle Menschen nutzbar sind – ein Platz für alle, die an heißen Tagen Abkühlung suchen.

Coolspots sind Installationen von kombinierten Begrünungs-, Wasser- und Beschattungselementen zur Kühlung auf zentralen asphaltierten Plätzen im dicht verbauten (Stadt-)Gebiet. Sie haben eine kühlende Wirkung und bieten inklusive individueller Sitzmöbel Aufenthaltsmöglichkeit für 20 bis 35 Personen. Ziel der Coolspots ist es, die individuell gefühlte Temperatur (Physiologische Äquivalenztemperatur – PET (ZAMG 2021)) der sich dort aufhaltenden Menschen unter 29 °C zu halten, egal welche Lufttemperatur die Umgebung hat. Dadurch werden Behaglichkeit und Wohlfühlen erzielt. Coolspots können auf verschiedenste Art und Weise ausgestaltet und auf die Gegebenheiten vor Ort sowie die Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer angepasst werden.

Die Hitze in der Stadt steigt, der Anteil an asphaltierten und bebauten Flächen ebenso. Coolspots bieten eine schnelle und attraktive Lösung für Städte und Bezirke, die der Hitze entgegenwirken und kühlende Oasen im öffentlichen Raum für die Bewohnerinnen und Bewohner bereitstellen wollen. Coolspots sind eine Möglichkeit auf versiegelten Flächen auf schnelle Weise kühlende Grün- und Wasserelemente einzurichten. Da kein Unterbau und keine Entsiegelung des Bodens notwendig sind, können Coolspots auch an Orten errichtet werden, welche nicht entsiegelt werden können. Dadurch sollen sie zu einer raschen und unkomplizierten Kühlung und Begrünung der Stadt beitragen.

Die Vorteile der Coolspots im Überblick:

- Coolspots sind kühlende Oasen an zentralen Orten im öffentlichen Raum. Sie bieten Aufenthaltsqualität und Nutzungsoffenheit (nutzbar für alle Menschen, ohne Konsumzwang).
- Coolspots sind nicht bodengebunden – dadurch ist eine schnelle, unkomplizierte Errichtung, auch auf betonierten Flächen möglich. Coolspots sind daher leicht multiplizierbar.
- Coolspots können je nach Bedarf und angepasst an die Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer sowie passgenau an die Umgebung ausgestaltet werden.

3. PRINZIPIEN EINES COOLSPOTS

Coolspots gelingen durch die Kombination von Architektur/Ästhetik mit Pflanzen und technischen Kühlsystemen und einer co-kreativen, synergetischen Planung. Die kühlende Wirkung entsteht durch die Kombination aus Beschattung, natürlicher Verdunstungskühlung durch Pflanzen und Pflanz-Substrate (Evapotranspiration) sowie technischer Verdunstungskühlung, wie zum Beispiel Hochdrucknebeltechnik.

Die Architektur der Coolspots sieht folgende Eckpfeiler vor: schattige Räume, Kühlleistung der Pflanzen, technische Kühlsysteme, optimiertes Windfeld. Pflanzen spenden Schatten und kühlen durch ihre Verdunstungsleistung die Luft spürbar ab. Zudem sind Pflanzen für die Aufenthaltsqualität, ästhetische Wirkung und Unverwechselbarkeit des Designs von zentraler Bedeutung. Pflanzen wirken nachweislich positiv auf Menschen (Lohr 2007). Kühlend wirken zudem Hochdrucknebelanlagen und Wasser in diversen Formen. Die Planung der Coolspots wird mit Hilfe von mikroklimatischen Simulationen optimiert und im Zuge der Umsetzung durch Klima-Messungen vor Ort überprüft. Zudem werden durch Beteiligungsformate Wünsche und Ideen sowie auch Rückmeldungen aus der Bevölkerung in die Planung einbezogen.

Im Wesentlichen ist das Zusammenspiel der folgenden vier Prinzipien das „Rezept“ für einen Coolspot:

- Ökologie und Vegetation (Bepflanzung)
- Technische Beschattung (Beschattung durch Textilien)
- Technische Kühlung (Hochdrucknebeltechnik und Sensorik)
- Aufenthaltsqualität und Nutzungsoffenheit

4. BETEILIGUNG UND MONITORING

4.1 BETEILIGUNG: ERKENNTNISSE ZU WÜNSCHEN UND BEDÜRFNISSEN DER NUTZERINNEN UND NUTZER

Die Partizipation im Projekt Tröpferbad 2.0 durchläuft mehrere Beteiligungsphasen (Abb. 1) mit dem Ziel die Coolspots nach den Wünschen und Bedürfnissen der zukünftigen Nutzerinnen und Nutzer zu gestalten und die tatsächliche Nutzung und Wirkung der Coolspots zu überprüfen. Die Menschen, die an den Beteiligungsformaten teilnehmen, geben so wichtigen Input für Kühlung, Ästhetik, Ausstattungen und Aufenthaltsqualitäten. Zusätzlich wird über das Projekt und die Projektziele informiert und die Akzeptanz erhöht.

Im Projektverlauf werden 3 Phasen in Bezug auf die Coolspots unterschieden:



Abb. 1: Beteiligungsphasen im Projekt

Die Bevölkerung wurde mit unterschiedlichen Beteiligungsformaten in die Planungsphase (2019) und Bauphase (2020, angepasst an die COVID-19 Situation) der Coolspots miteinbezogen:

Die Coolspots wurden unter Beteiligung der künftigen Nutzerinnen und Nutzer an den beiden Standorten entwickelt. Durch verschiedene Aktivitäten der Bürger*innenbeteiligung, wie mündliche Befragungen vor Ort, Fragebögen, Ideensammlungen, Stakeholder Gespräche etc., konnten die Wünsche und Bedürfnisse sowie Meinungen der künftigen Nutzerinnen und Nutzer vor Ort in die Planung der Coolspots miteinbezogen werden. Während dem Bau der Coolspots konnten zudem erste Rückmeldungen und Stimmungsbilder zu den tatsächlichen Umsetzungen gesammelt werden. (Näheres zu den Ergebnissen der partizipativen Maßnahmen in Planungs- und Bauphase kann in den Ergebnis-Berichten nachgelesen werden: <https://www.troepferlbad.at/downloads/>)

4.2 MONITORING IN DER NUTZUNGSPHASE: MIKROKLIMATISCHE UND SOZIALE WIRKSAMKEIT DER COOLSPOTS NACH ERRICHTUNG

Die sogenannte „Nutzungsphase“ wurde mit Errichtung der beiden Coolspots im Spätsommer 2020 eingeläutet. Seitdem werden die Coolspot Standorte einem Monitoring unterzogen. Bei einem Monitoring werden verschiedene Faktoren und Parameter beobachtet. Im Projekt werden mikroklimatische Daten (z.B. Temperatur) gemessen, die tatsächliche Nutzung beobachtet sowie die tatsächliche Kühlung und Behaglichkeit aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer erfragt. Auch Rückmeldungen und weitere Vorschläge zur Optimierung werden aufgenommen.

Die Nutzungs- und Monitoringphase im tatsächlichen Betrieb der Coolspots ist ein Herzstück des Projekts. In dieser Phase wurden und werden die Ziele der Coolspots geprüft, um zu erfassen, was die Coolspots tatsächlich erwirken – mikroklimatisch und sozial. Was waren die Ziele und wie wirken die Coolspots einerseits auf das Mikroklima und andererseits auf die Nutzerinnen und Nutzer?

4.2.1 Naturwissenschaftliches Monitoring – Methodik

Um die mikroklimatische Wirksamkeit und die tatsächliche Kühlung in den Coolspots zu erforschen, wurden vor Ort Klima-Mess-Stationen installiert – jeweils eine Mess-Station im Coolspot und eine Mess-Station außerhalb des Coolspots. Dadurch können mikroklimarelevante Parameter, wie Lufttemperatur in °C, Dampfdruck in hPa, Globalstrahlung in W/m², Niederschlag in mm/h, Windgeschwindigkeit in m/s, Windböen in m/s und Windrichtung in Grad, im Coolspot und außerhalb des Coolspots (Umgebung) gemessen und verglichen werden. Die Daten werden im 15 Minuten-Takt gemessen und mittels eines Datenloggers an jedem der Standorte stündlich automatisiert an eine Datenbank/Cloud gesendet. Zusätzlich werden mehrmals pro Monat Messungen mit einem Hand-Messgerät (Thermohygrometer) durchgeführt und Thermaldarstellungen mit einer Wärmebildkamera angefertigt. Durch den Vergleich wird die tatsächliche kühlende Wirkung deutlich.

Die Temperatur kann einerseits in Grad Celsius (°C) gemessen werden. Andererseits hat jeder Mensch ein unterschiedliches thermisches Wohlbefinden (menschliche Wohlbefinden in Abhängigkeit von der Temperatur) und nimmt Temperatur anders wahr. Dieses Temperaturempfinden setzt sich aus mehreren Faktoren, wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie Strahlung zusammen. Das thermische Wohlbefinden kann durch die gefühlte Temperatur (Physiologische Äquivalenz Temperatur – PET) dargestellt werden. Die gemessenen Kenngrößen des PET werden in das Klimabeurteilungstool RayMan von Prof. Dr. Andreas Matzarakis eingespeist und der PET für den gefragten Zeitpunkt errechnet (Matzarakis et al. 2007; Matzarakis et al. 2010).

Zudem wurde ein Vegetationsmonitoring mit monatlicher Bonitur und Vitalitätskontrolle der Vegetation durchgeführt sowie anhand von Nebelchoreographien und Datenblättern der technischen Komponenten der Coolspots Hochrechnungen zu Wasser und Stromverbrauch angestellt. Das naturwissenschaftliche Monitoring zeigt mikroklimatische Wirkungen und Veränderungen auf. Daraus lässt sich weiterer Handlungsbedarf ableiten, der eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassungsstrategie für den Klimawandel und des Aktionsplans für die Stadtentwicklung darstellt.

4.2.2 Soziales Wirkungs-Monitoring – Methodik

Wie bereits beschrieben, ist ein Ziel der Coolspots, Menschen einen kühlenden Ort zu bieten, in dem die gefühlte Temperatur unter 29 °C bleibt. Daher wurden die Nutzerinnen und Nutzer auch zu ihrer subjektiv gefühlten Temperaturwahrnehmung in den Coolspots befragt. Zusätzlich wurden die tatsächlichen Nutzungen der Coolspots und die Zufriedenheit der Nutzerinnen und Nutzer beobachtet und erfragt. Nutzerinnen und Nutzer der Coolspots hatten die Möglichkeit ihre Meinungen zum Design und zur kühlenden Wirkung der Coolspots an das Projektteam zu kommunizieren. Das Feedback dient vor allem dazu weitere künftige Coolspots zu optimieren. Spezielle Berücksichtigung erhielten Wirkungen der Coolspots in Hinblick auf vulnerable Personengruppen (= Menschen, die besonders unter der sommerlichen Hitze leiden), wie beispielsweise Kinder und Jugendliche sowie einkommensschwache Personen und Menschen mit geringem oder keinem Wohnraum. Das gesammelte Feedback der befragten Personen ist ein wichtiger Bestandteil, um vor allem künftige Coolspots maßgeschneidert auf die Bedürfnisse und Wünsche der Bevölkerung anzupassen und weiter zu verbessern.

5. ERSTE MONITORING-ERGEBNISSE

5.1 NATURWISSENSCHAFTLICHES MONITORING

Die ersten Ergebnisse zum PET zeigen eine über den gesamten Tag niedrigere gefühlte Temperatur im Coolspot. Die Berechnungen wurden beispielhaft für einen Hitzetag durchgeführt mit maximalen Unterschieden zu den Referenzmessungen von -12,2 °C PET am Coolspot Esterházyark sowie -11,3 °C PET beim Coolspot Schlingermarkt. Über den gesamten Tag gesehen ergibt sich eine Verbesserung des PET im Coolspot um -5,8 °C PET am Coolspot Esterházyark und -7,1 °C am Coolspot Schlingermarkt gegenüber den jeweiligen Referenzmessungen.

Erste Ergebnisse der Nebelchoreographien und der Datenblättern der technischen Komponenten zu Wasser und Stromverbrauch des Coolspot Esterházyark wurden hochgerechnet. Durch unterschiedlich starke Nutzung und mikroklimatischen Gegebenheiten ergeben sich drei mögliche Nebelszenarien.

- Szenario 1 mit einer geringen Nebeldauer, reduzierten Anzahl aktiver Nebeldüsen, geringer Außentemperatur und schwacher Nutzung ergibt einen Verbrauch von 27,5 l Wasser und 2,5 kWh Strom pro Tag.
- Szenario 2 geht von einer mittleren Nutzung bei einer mittlerer Nebeldauer, reduzierter Anzahl von aktiven Nebeldüsen aus und verbraucht 125,4 l Wasser und 3,78 kWh Strom pro Tag.
- Szenario 3 geht von einer maximalen Nutzung, Nebeldauer und Aktivierung aller Nebeldüsen aus und verbraucht somit 224,4 l Wasser und 5,04 kWh Strom pro Tag, etwas weniger als der tägliche Gesamthaushaltsverbrauch an Wasser von zwei WienerInnen und etwa die Hälfte des täglichen Stromverbrauchs eines durchschnittlichen Wiener Haushalts (MA31 2021, MA20 2019). Hervorzuheben ist, dass Wasser nicht verschwendet wird, sondern für lokale Kühlung eingesetzt wird und somit der Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Coolspot dient.

Mit den genaueren mikroklimatischen Auswertungen wird mit Ende der Monitoringsphase im Oktober 2021 begonnen.

5.2 SOZIALES WIRKUNGS-MONITORING

5.2.1 Esterházyark im 6. Wiener Gemeindebezirk

Zu den Nutzungen und den Personengruppen, die den Coolspot im Esterházyark nutzen, ist festzuhalten, dass der Coolspot sehr vielfältig genutzt wird. Vor allem wird der Coolspot genutzt als Erholungs-ort oder auch Treffpunkt, zum Pausieren in der Mittagspause, zum kurzen Verweilen und Warten – vor allem durch Touristinnen und Touristen, die das nahegelegene „Haus des Meeres“ besuchen. Auch viele Familien mit Kindern nutzen den Coolspot zum Spielen. Der Coolspot wird auch durch junge Erwachsene für Sportaktivitäten genutzt und ist zuweilen auch ein Ort der Kreativität. Menschen, die

in der Nähe arbeiten oder wohnen, nutzen den Coolspot unter anderem auch als Ort zum Arbeiten oder für Besprechungen oder zum Lernen.



Abb. 2: Vielfältige zeitgleiche Nutzungen im Coolspot Esterházyark (Foto: B-NK GmbH 2021)



Abb. 3: Vielfältige zeitgleiche Nutzungen im Coolspot Esterházyark (Foto: B-NK GmbH 2021)

Vertreterinnen und Vertreter von Interessensgruppen und aus der Politik sind dem Coolspot allesamt sehr positiv gestimmt. In den Interviews wurde oft darauf hingewiesen, dass der Coolspot sehr gut angenommen wird, dass die Nutzung sehr vielfältig ist und trotz der vielfältigen Nutzungen und Nutzer*innengruppen ein friedliches Zusammentreffen stattfindet. Eine Interviewperson fasste es so zusammen: „Der Coolingpark ist ein Labor und ein Exemplar, wie man Kühlung im öffentlichen Raum schaffen kann.“

Zusätzlich wurden mit Kindern und Jugendlichen Schulworkshops durchgeführt. Die Kinder und Jugendlichen wurden zu ihrer Meinung zum Coolspot befragt.

Tab. 1: Meinungen von Kindern und Jugendlichen zum Coolspot Esterházypark (Erhebung: B-NK GmbH 2021)

Frage	Ja	Weiß nicht	Nein
Kennst du den Coolspot?	19	0	13
Bist du oft an diesem Ort?	0	1	12
Bist du schon im Coolspot gegessen/hast du ihn schon genutzt?	2	0	12
Gefällt dir der Coolspot?	25	11	10
Kannst du dir vorstellen den Coolspot zu nutzen?	3	10	19
Glaubst du, wirst du mit deinen Freundinnen und Freunden herkommen?	5	7	16
Empfindest du den Coolspot als kühlend/angenehm an Hitzetagen?	36	24	0
Findest du, dass es davon mehr geben sollte in der Stadt?	52	7	1
Glaubst du, dass viele Coolspots in der Stadt gegen die Hitze in der Stadt helfen können?	14	0	0

Tab. 1 zeigt, dass einige Kinder und Jugendliche noch nie im Coolspot waren bzw. den Coolspot noch nicht genutzt haben. Dennoch gibt ein Großteil der Befragten an, dass ihnen der Coolspot gut gefällt. Den Ergebnissen zufolge sind die Befragten eher zögerlicher, ob sie sich vorstellen können, den Coolspot zu nutzen und mit Freundinnen und Freunden herzukommen, dennoch empfinden sie den Coolspot als kühlend und angenehm an heißen Tagen und sind auch der Meinung, dass es mehr davon geben sollte in der Stadt und dass viele Coolspots gegen die Hitze in der Stadt helfen können.

Die Kinder und Jugendlichen wurden auch befragt, wie sie die Temperatur innerhalb vom Coolspot und außerhalb vom Coolspot einschätzen. Der Mittelwert daraus ergibt, dass die geschätzte Temperatur außerhalb des Coolspots im Mittel mit 28,6 °C eingeschätzt wurde und innerhalb des Coolspots mit 23,4 °C. Auch der subjektive Wohlfühlfaktor – innerhalb und außerhalb des Coolspots im Zusammenhang mit der Temperatur wurde erfragt. 60 % der Kinder und Jugendlichen fühlen sich innerhalb des Coolspots sehr wohl bis eher wohl und außerhalb des Coolspots geben 86 % an, dass sie sich eher nicht wohl bzw. gar nicht wohl fühlen bezogen auf die Temperatur.

5.2.2 Schlingermarkt im 21. Wiener Gemeindebezirk

Eine Besonderheit findet sich am Schlingermarkt, denn es hat sich eine Gruppe von „Stammgästen“ gebildet, die jeden Tag den Coolspot nutzt – für sie ist der Coolspot vor allem ein sozialer Treffpunkt und ein Ort der Kommunikation. Sie nutzen den Coolspot zum Zusammensitzen, zum Plaudern, zum Austausch, Essen und Trinken. Diese Gruppe hat sich im und durch den Coolspot kennengelernt und besteht aus Bewohnerinnen und Bewohnern aus der unmittelbaren Umgebung – vor allem aus dem Schlingerhof, einer Wohnanlage mit eher kleineren Wohnungen, ohne Balkone und mit wenig Durchlüftungsmöglichkeiten. Zudem wird der Coolspot als Erholungsort – vorwiegend von Einzelpersonen genutzt, zum Abkühlen im Coolspot oder Sonne genießen, Musik hören, Lesen, Essen, Trinken, sowie zum kurzen Verweilen oder Pausieren, vor allem von Marktbesucherinnen und -besuchern.



Abb. 4: „Stammgäste“ im Coolspot Schlingermarkt (Foto: B-NK GmbH 2021)



Abb. 5: Abkühlung im Coolspot Schlingermarkt (Foto: B-NK GmbH 2020)

Auch am Schlingermarkt wurden Workshops mit Kindern und Jugendlichen durchgeführt und deren Meinungen zum Coolspot erfasst.

Tab. 2: Meinungen von Kindern und Jugendlichen zum Coolspot Schlingermarkt (Erhebung: B-NK GmbH 2021)

Frage	Ja	Weiß ich nicht	Nein
Bist du oft an diesem Ort?	31	3	21
Gefällt dir der Coolspot?	50	24	2
Bist du schon im Coolspot gegessen/hast du ihn schon genutzt?	5	4	55
Kannst du dir vorstellen den Coolspot zu nutzen?	32	23	0
Glaubst du, wirst du mit deinen Freundinnen und Freunden herkommen?	17	4	0
Empfindest du den Coolspot als kühlend/angenehm an Hitzetagen?	12	0	0
Findest du, dass es davon mehr geben sollte in der Stadt?	39	25	0
Glaubst du, dass viele Coolspots in der Stadt gegen die Hitze in der Stadt helfen können?	19	1	1

Wie die Tab. 2 zeigt, gaben die meisten Befragten an, dass ihnen der Coolspot gefällt und sie sich vorstellen können, ihn zu nutzen. Die Kinder und Jugendlichen können sich Großteils vorstellen, mit Freundinnen und Freunden herzukommen und sie empfinden den Coolspot als kühlend und angenehm an heißen Tagen.

Bezogen auf die geschätzte Temperatur, gaben die Kinder und Jugendlichen eine mittlere geschätzte Temperatur außerhalb des Coolspots mit 31,1 °C und innerhalb des Coolspots mit 25,3 °C an. Auch am Schlingermarkt haben 68 % der befragten Kinder und Jugendlichen angegeben, dass sie sich mit der Temperatur im Coolspot sehr wohl bis eher wohl fühlen. 83 % haben angegeben, dass sie sich mit der Temperatur außerhalb vom Coolspot eher nicht wohl bis gar nicht wohl fühlen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass beide Coolspots von den Nutzerinnen und Nutzern gut angenommen werden und ähnliche Nutzungen zu beobachten sind, auch wenn die Nutzungsfrequenz an den beiden Standorten unterschiedlich ist. Die Coolspots werden vielfach als Treffpunkt oder Erholungsort, für kurzes Verweilen und Pausieren genutzt. An beiden Orten ist der Kühlungseffekt wirklich spürbar. Trotzdem besteht an beiden Standorten der Wunsch nach stärkerer Vernebelung bzw. niedriger montierten Düsen für den Sprühnebel.

LITERATUR

- Lohr V. (2007) Benefits of Nature: What We Are Learning about Why People Respond to Nature. In: Journal of Physiological Anthropology (26(2)), S. 83–85.
- Magistrat der Stadt Wien 20 – Energieplanung (2019) Verbrauch elektrischer Energie in kWh/Kopf nach Bundesländern <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/verbrauch-elektrischer-energie-pro-kopf-nach-bundeslandern>
- Magistrat der Stadt Wien 31 - Wiener Wasser (2021) Wasserverbrauch. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/wienwasser/verbrauch.html>
- Matzarakis A., Rutz F. & Mayer H. (2007) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. In: International Journal of Biometeorology 51(4), 323–334. doi: 10.1007/s00484-006-0061-8.

- Matzarakis A., Rutz F. & Mayer H. (2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. In: *International Journal of Biometeorology* 54(2), 131–139. doi: 10.1007/s00484-009-0261-0.
- Rößler S. (2015) Klimawandelgerechte Stadtentwicklung durch grüne Infrastruktur. In: *Raumforschung und Raumordnung* 73 (2), S. 123–132. DOI: 10.1007/s13147-014-0310-y.
- ZAMG (2021) Gefühlte Temperatur. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/gefuehlte-temperatur>

KONTAKTDATEN:

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Bente Knoll
B-NK GmbH
Schönbrunner Straße 59-61/10
1050 Wien
E-Mail: bente.knoll@b-nk.at

Session 5b

Quartiere der Zukunft

PLUS-ENERGIE MELK: Erfahrungen bei der Sondierung von Plus-Energie-Arealen

Grim-Schlink, Hofer, Stipsits / e7 energy innovation & engineering / AT



Engineering progress
Enhancing lives

Ihr Wasserhahn kann nur heiß oder kalt. Wie wäre es mit mehr Abwechslung?

Erwarten Sie mehr von Ihrem Wasserhahn: mit RE.SOURCE, der smarten Armatur, genießen Sie gefiltertes, gekühltes, gesprudelttes und kochend heißes Wasser aus nur einem Gerät.

www.rehau.at/expectmore

 **REHAU**

PLUS-ENERGIE MELK: Erfahrungen bei der Sondierung von Plus-Energie-Arealen

M. Grim-Schlink, G. Hofer, A. Stipsits
e7 energy innovation & engineering, Wien, Österreich

ABSTRACT: Positive Energy Districts (PED) are a piece of the puzzle for the goal of climate neutrality in the coming decades. An important stakeholder is the administration and the political representatives of a city. The efforts of the city of Melk are shown as a concrete example: Melk sets itself the goal of setting high standards for climate protection and renewable energy resources in current and future urban development areas. This also includes the realisation of plus-energy areas in current urban development areas.

A common catalogue of requirements for Positive Energy Districts was developed on the basis of the needs and goals of developers, the city of Melk and citizens. The requirements of the World Heritage Site were also taken into account for the area in the centre. The individual sites were examined by means of energy space analyses, energy concepts and technical-organisational analyses, and suitable digital solutions for demand response were proposed. Possible approaches of business models and energy communities were analysed. Through the active participation of the city of Melk as well as the property owners and developers involved, and with the involvement of citizens, acceptance is to be ensured as a preparation for implementation and a concept for plus-energy areas that is as practical as possible.

The result of the project is a process for the early support of municipalities and cities in the development of Plus-Energy sites. These results will also be taken into account and further developed internationally within the framework of the JPI Urban Europe project PED-ID. A decision-making template for developers and investors was developed for specific sites. In addition, a roadmap for the city of Melk for the realisation of Plus-Energy sites was created in order to have already identified important steps for the coming years. By preparing the results and findings of this exploratory process for other small towns, the aim is to give them an impetus and support for the realisation of Plus-Energy sites.

1. EINLEITUNG

Die Stadt Melk hat sich zum Ziel gesetzt, in bestehenden und geplanten Stadtentwicklungsgebieten besondere Anforderungen an Klimaschutz und erneuerbare Energieressourcen zu stellen. In Vorbereitung auf die Umsetzung werden zwei unterschiedliche Entwicklungsgebiete daraufhin untersucht, welche technischen Maßnahmen, organisatorischen Lösungen und wirtschaftlichen Effekte für die Umsetzung von Plusenergiegebieten erforderlich sind. Ergebnisse zeigen, dass eine Plus-Energie-Bilanz im Bereich des Stadtzentrums (Boulevard Melk) schwierig, aber machbar sein wird; hier wird auch die Definition von Plus-Energie-Flächen eine Rolle spielen. Im Gebiet am Stadtrand (Melk Süd) hingegen wird die Plus-Energie-Bilanz bereits in der ersten Phase der Gebietsentwicklung realisiert werden. Damit kann auch in diesem Gebiet ein gutes Signal für die weitere Entwicklung gesetzt werden.

1.1 ECKDATEN ZUR STADT

Die Stadtgemeinde Melk hat rund 5.600 Einwohner und ist Bezirkshauptstadt mit rund 78.000 Einwohner des Bezirks. Die Altstadt Melk ist Teil des UNESCO Weltkulturerbes Wachau. Bauliche Maßnahmen in diesem Gebiet stehen somit unter hohen Anforderungen des Gebäude- und Ensembleschutzes. Für die Wärmeversorgung im Stadtzentrum steht ein Biomasse-Heizwerk zur Verfügung.

1.2 ÜBERBLICK ZU DEN PLUS-ENERGIE AREALEN IN DER STADT

Im Gebiet der Stadt Melk werden in den kommenden Jahren zwei größere Entwicklungsgebiete realisiert (Tab. 1):

- Boulevard Melk: ein innerstädtisches Entwicklungsgebiet mit rund 18.000 m² Nutzfläche am Rande der Altstadt, die unter UNESCO Weltkulturerbe-Status steht, wo bestehende Gebäude abgerissen werden, das Areal umgenutzt wird und auch ein neuer Waldgarten entsteht.
- Melk Süd: Neues Stadtentwicklungsgebiet auf der grünen Wiese mit rund 350.000 m² Nutzfläche, mit vorwiegend Wohnbauten und im geringen Ausmaß gewerbliche Nutzungen

In Tab. 1 sind die wichtigsten Eckdaten der beiden Areale zusammengefasst.

Tab. 1: Überblick über die Areale

Name	Boulevard Melk	Melk Süd
Größe Fläche Areal	Ca. 20.000 m ² = 2 ha	Ca. 600.000 m ² = 60 ha
Größe Nutzflächen	ca. 18.000 m ²	Ca. 350.000 m ²
Anzahl Gebäude	ca. 7 Gebäude	Steht noch nicht fest
Anzahl Bewohner in Wohnungen	Überwiegend Nicht-Wohnnutzung; ca. 150 EW	Ca. 2.700 EW
Neubau/Bestand	Vorwiegend Abbruch/Neubau + Bestand/Sanierung	Vorwiegend Neubau
Nutzungsart	Gewerbe, Wohnen, Handel, Hotellerie	Vorwiegend Wohnen, geringfügig Gewerbe
UNESCO Anforderungen	Ja, für Neubauten und PV Anlagen am Dach	Nein
Baubeginn	Ca. 2022	Ca. 2025
Fertigstellung	Ca. 2023	Ca. 2040
Gemeindegebäude im Areal	Nein	Ja: Sportzentrum, Feuerwehr

Diese Gebiete (Abb. 1) sind sehr unterschiedlich gestaltet, nachfolgend einige Gegensätze:

- Vorwiegend Nicht-Wohngebäude vs. vorwiegend Wohngebäude;
- Bestandsgebäude mit hohen Anforderungen an den Denkmalschutz auf Basis der Richtlinien der UNESCO vs. Neubauten mit vorwiegend Anforderungen der Wohnbauförderung;
- innerstädtisches Gebiet vs. Bebauung am Rande der Stadt auf der „grünen Wiese“
- Geplante Umsetzung in den nächsten Jahren vs. Start der baulichen Umsetzung Mitte der 2020er Jahre.

Es werden zwei Areale im Rahmen der Sondierung geprüft, weil die unterschiedlichen Situationen und Zeitpläne unterschiedliche Aktivitäten erfordern und somit gute Möglichkeiten für vielseitige Erkenntnisse gegeben sind.



Abb. 1: Stadtentwicklungsgebiete Melk Areale (adaptiert nach Basemap 2021)

1.3 ZIELSETZUNG DER STADT

Die Stadt Melk setzt sich als Ziel, bei aktuellen und künftigen Stadtentwicklungsgebieten hohe Ansprüche an Klimaschutz und erneuerbare Energieressourcen zu setzen. Dazu zählt auch die Realisierung von Plus-Energie Arealen in aktuellen Stadtentwicklungsgebieten. Darüber hinaus setzt sich die Stadt zum Ziel, Pilotgemeinde im Rahmen der Umsetzung von lokalen Energiegemeinschaften zu sein. Um als Beispiel voranzugehen, werden in den nächsten Monaten auf gemeindeeigenen Gebäuden großflächig PV-Anlagen umgesetzt.

Bei den genannten Projekten soll geprüft werden, ob und wie eine Realisierung hinsichtlich Plus-Energie Areale umsetzbar ist. Dabei wird auf die unterschiedlichen Ausgangspositionen Rücksicht genommen:

- ein kleines innerstädtisches Gebiet, mit vorwiegend Gewerbenutzung, am Rande der historischen Altstadt;
- sowie ein größeres Gebiet in der „grünen Wiese“, mit vorwiegend Wohnnutzung.

2. METHODISCHE GRUNDLAGEN

Am Beginn des Projekts stand die Auseinandersetzung mit der Definition für Plus-Energie Areale. Gerade die gegensätzlichen Ansätze beider Gebiete können für die Konkretisierung der Definition einen wichtigen Beitrag leisten. Nachdem derzeit international noch keine eindeutige Definition für Plus-Energie Areale vorliegt, sollen die Systemgrenzen transparent dargestellt werden (Siehe Tab. 2 und Abb. 2).

Auf Basis der Bedarfe und Ziele von Bauherren sowie der Stadt Melk wird ein gemeinsamer Anforderungskatalog für Plus-Energie Areale entwickelt. Dabei wird im Areal im Zentrum auch auf die Anforderungen des Weltkulturerbes eingegangen.

Die einzelnen Areale werden mittels Energieraumanalysen, Energiekonzepten sowie technisch-organisatorischen Analysen überprüft sowie geeignete organisatorische Lösungen für die Umsetzung von großflächigen PV-Anlagen vorgeschlagen.

Durch die aktive Beteiligung der Stadt Melk sowie der beteiligten Grundstückseigentümer und Bauherren soll die Akzeptanz als Vorbereitung für eine Umsetzung und ein möglichst praxisnahes Konzept für Plus-Energie Areale sichergestellt werden.

Tab. 2: Systemgrenzen der Plus-Energie Bilanzierung

Betrachtungsdimensionen	Festlegung
Indikator Energiedienstleistung	Primärenergie gesamt
Zielsetzung	Plus-Energie Bilanz
Zeitraum Bilanzierung	Jährlich
Räumliche Abgrenzung	Wärme: Energieproduktion außerhalb des Grundstücks, mit direkter Versorgung Strom: Produktion auf der Liegenschaft
Energienutzungen	Betriebsenergie: <ul style="list-style-type: none"> • Heizen • Kühlen • Be-/Entfeuchtung • Hilfsenergie • Beleuchtung im Gebäude • Beleuchtung im Quartier Alltagsmobilität: Motorisierter Individualverkehr
Anmerkungen	Räumliche Abgrenzung: Produktion außerhalb der Liegenschaften in angrenzenden Gebieten wird jedenfalls geprüft und gegebenenfalls berücksichtigt Mobilität: In Melk Süd erfolgt die Bilanzierung mit und ohne Energieaufwände für Mobilität. Im Areal Boulevard Melk wird der Energieeinsatz für Mobilität nicht berücksichtigt.

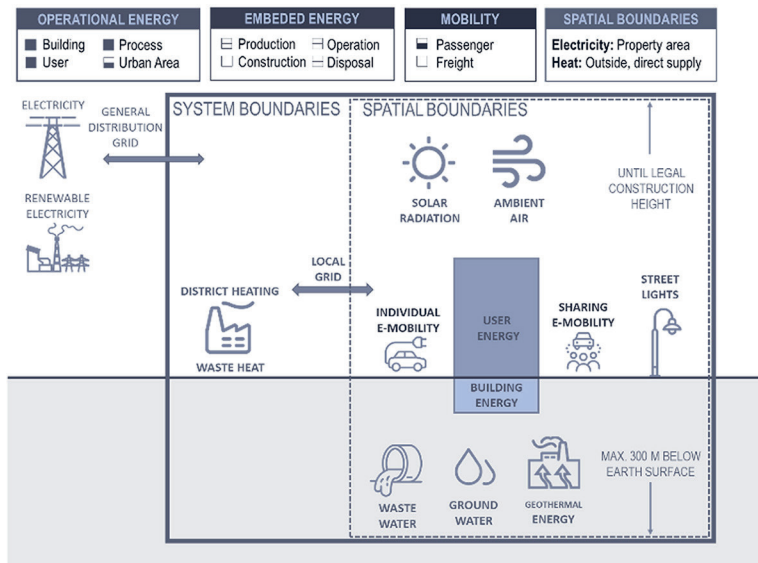


Abb. 2: Systemgrenzen der Plus-Energie Bilanzierung

3. ERGEBNISSE

3.1 BOULEVARD MELK IM STADTZENTRUM

Mit der Annahme, dass die Erträge aus erneuerbaren Energiequellen innerhalb der räumlichen Abgrenzung des Areals Boulevard Melk ausreichend sein müssen für einen Plus-Energie Bilanz, kann aus jetziger Sicht ein Plus-Energie Status nur dann erreicht werden, wenn zusätzliche PV Flächen im Areal installiert werden oder ein größeres Augenmerk auf die Reduktion des Energieverbrauchs gelegt wird. Zum einen, weil – wie im geplanten Kulturzentrum – teilweise eine sehr hohe Energienachfrage vorliegt, zum anderen, weil bei einzelnen Planungen teilweise die Dachfläche und teilweise die Gebäudewand nicht für die PV-Nutzung herangezogen werden können.

Wird für die PV nur die am Boulevard zur Verfügung stehende Fläche genutzt, dann ist es annähernd möglich, den gesamten Stromverbrauch durch den erneuerbaren Strom zu decken. Eine detailliertere Konzeptionierung der erneuerbaren Energieträger sowie eine Qualitätssicherung für die Planung und baulichen Umsetzung der Gebäude ist dafür erforderlich.

3.2 MELK SÜD AM STADTRAND

Neben den unterschiedlichen Niveaus für den Energiebedarf wurden auch drei Szenarien für die PV Nutzung erstellt:

- Photovoltaik Dach: 95 % der potentiellen Dachflächen belegt (51 % der Gesamtdachfläche)
- Photovoltaik Dach/Fassade: zusätzliche Teile der Südfassade belegt
- Photovoltaik Total: Zusätzlicher Lärmschutzwall entlang der Autobahn und sporadisch Nebengebäude (Carports) belegt

Für die Bilanzierung wurden die Gebäudestandards und die Optionen der Erneuerbaren vereint und zusätzlich die Energiebereitstellung (Fernwärme, Wärmepumpen) und die Bilanzgrenze (E-Mobilität) variiert. In Abb. 3 ist die Primärenergiebilanz bei einer angenommenen Wärmeversorgung von 50 % Wärmepumpen und 50 % Fernwärme graphisch dargestellt.

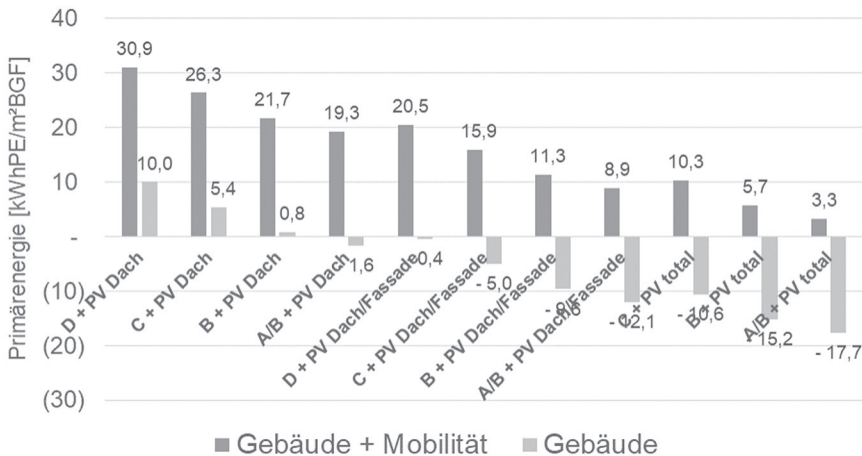


Abb. 3: Primärenergiebilanz (Annahme für die Wärmeversorgung: 50 % Nahwärme, 50 % Wärmepumpen)

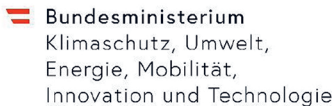
4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Je nachdem, wie die Systemgrenzen der Quartiere betrachtet werden, kann es zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Deckung des Stromverbrauchs durch Erneuerbare kommen. Beim Boulevard Melk müsste man die zusätzlichen Flächen im Areal ebenfalls für die Installation von PV-Modulen nutzen, um den Stromverbrauch decken zu können. Grund dafür sind die energieintensiven Gewerbe (z.B. Restaurant, Handel usw.), die am Boulevard Melk untergebracht werden sollen. Im Umkreis gäbe es auch einige Flächen, die derzeit nicht genutzt werden, und sich auch aufgrund ihrer Ausrichtung sehr gut für eine PV-Anlage eignen würden. Laut der Simulation wäre damit sogar ein Stromüberschuss möglich, der auch für andere Gebiete rund um den Boulevard genutzt werden könnte.

Beim Quartier Melk Süd wird eine Plus-Energie Bilanz dann erreicht, wenn ein ausgezeichneter Gebäudestandard und ein hoher Anteil an Erneuerbarer berücksichtigt wird. Wenn der Energiebedarf für Mobilität nicht in der Plus-Energie Bilanz berücksichtigt wird, kann auch mit geringeren Anforderungen an Gebäudestandard und Erneuerbare eine positive Bilanzierung gelingen.

5. HINWEISE

Das Projekt „Plus-Energie Melk“ wurde durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie im Rahmen des Förderprogramms Stadt der Zukunft gefördert.



Weitere Informationen auf der Projektwebsite im Rahmen der Plattform Nachhaltig Wirtschaften:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/plus-energie-melk.php>

Erfahrungen des Projektes werden in das transnationale Projekt „PED-ID Holistic assessment and innovative stakeholder involvement process for identification of Positive-Energy-Districts“ im Rahmen des Initiative JPI Urban Europe eingebracht.



LITERATUR

Basemap (2021) Verwaltungsgrundkarte von Österreich. 1. September 2021. www.basemap.at.

KONTAKTDATEN:

Gerhard Hofer
e7 energy innovation & engineering
Walcherstraße 11/43
1020 Wien
Email: gerhard.hofer@e-sieben.at

Session 6b

Energiekonzepte – Fassaden

Reaching PEB with renovated building using Multi-functional façades

Hengel, Gumhalter, Ramschak / AEE INTEC / AT

Sanierung von Geschößwohnbauten mit thermisch aktivierten Fassaden – Bestimmung des Flexibilitätspotentials

Gumhalter, Hengel, Ramschak / AEE INTEC / AT

Energy²POG: Eine grüne Oase am Pogusch

Höfler, Weiß, Hengel, Wagner / AEE INTEC / AT

Reitbauer / Steirereck GmbH / AT

Pichler / TBH GmbH / AT

Reaching PEB with renovated building using Multi-functional façades

F. Hengel, M. Gumhalter, Th. Ramschak

AEE – INSTITUTE FOR SUSTAINABLE TECHNOLOGIES, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: As the building sector is very important to reach the EU energy savings goals, a directive was approved and named as EPBD 2010/31/EU in 2010. Another directive to boost the goals was approved in 2012 named Energy Efficiency Directive 2012/27/EU. Hence, this issue became more and more important both directives were then amended and covered within the Energy Performance of Buildings Directive 2018/844/EU, which includes new further elements and motivation to modernize the building sector mainly by means of increasing the building renovation rate. Therefore, the commission presented its renovation wave strategy as part of the European Green Deal in October 2020. In fact, according to the European Commission, the building sector holds about 40 % of the EU energy consumption and 35 % of the buildings are older than 50 years, where almost 75 % of the building stock is energy inefficient. Another statistic from the European Commission shows that the renovation rate is only about 1 % of those buildings. In Austria, the situation is similar to the abovementioned situation for the EU, that the thermal renovation rate is lower than 1 %, which is significantly lower than the goals set in the Austrian climate protection report (2 % between 2020 - 2030). To tackle this the paper presents a possibility to drive existing building from 1960's to 1980's to positive energy buildings (PEB) in Austria by implementing a multi-functional façade system by means of simulation studies. The demonstrator is chosen from a real building (a former feed silo) that is going to use as a multi storey residential building with location in Graz. The multi-functional façade includes not only a thick insulation to avoid heat losses/gains but also an innovative system where the dissipation system conditions the high thermal masses for heating and cooling purposes. The innovative system and the building are modelled and simulated in IDA ICE and assessed with defined KPI's to reach PEB status in the local area of the demonstrator, and hence to show possibilities in general to increase the renovation rate due to simple installation with less disturbances of the users. A main part in the plant system is the water-well as source connected to the heat pump system for heating or cooling (WWHP) of the building. Another renewable energy source is the building integrated PV (BiPV) that is used to produce electricity for the building and helps to reach PEB. A special attention within this paper is given to the comfort criteria of the rooms as the multi-functional façade provides "delayed" thermal energy/capacities due to high thermal masses between the emission system and the conditioned rooms. To reach PEB, different simulations are carried out where the results show that PEB status with the assumed boundary conditions can be reached with the abovementioned assumptions.

1. INTRODUCTION

As the building sector is very important to reach the EU energy savings goals, a directive was approved and named as EPBD 2010/31/EU (2010) in 2010. Another directive to boost the goals was approved in 2012 named Energy Efficiency Directive 2012/27/EU. Hence, this issue became more and more important both directives were then amended and covered within the Energy Performance of Buildings Directive 2018/844/EU (2018), which includes new further elements and motivation to modernize the building sector mainly by means of increasing the building renovation rate. Therefore, the commission presented its renovation wave strategy as part of the European

Green Deal in October 2020. In fact, according to the European Commission, the building sector holds about 40 % of the EU energy consumption and 35 % of the buildings are older than 50 years, where almost 75 % of the building stock is energy inefficient. Another statistic from the European Commission shows that the renovation rate is only about 1 % of those buildings. In Austria, the situation is similar to the abovementioned situation for the EU, that the thermal renovation rate is lower than 1 %, which is significantly lower than the goals set in the Austrian climate protection report (2 % between 2020 - 2030).

According to Fink et al. (2017), in Austria there is a high share of buildings from the 1960's to 1980's with either less insulation or no insulation. These buildings are responsible for high energy consumption in Austria and hence there is a high potential to save energy by using innovative concepts. Höfler et al. (2006) shows that in many residential buildings in this era the external walls consist of concrete wall systems, vertical coring brick or mantle block. These u-values range typically between 0.7 W/(m².K) and 1.5 W/(m².K) according to Energieagentur Steiermark (2016).

To tackle this problem simulation studies with an innovative concept based on a demonstrator for mainly residential and with ferro-concrete as well as vertical coring brick located in Graz is carried out within this paper with the aim to reach PEB and trying to increase the renovation rate of such buildings in Austria.

2. BOUNDARY CONDITIONS AND BUILDING

2.1 CLIMATE DESCRIPTION

The location of the demonstrator is in Graz, Austria but for the simulations, the weather data from Graz-Thalerhof Airport (latitude: 47.0 N; longitude: 15.43 E at an elevation of 340 m) is used as this data is close to the object site and the weather data includes typical reference years (TRY) with measurements. The lowest ambient temperature ϑ_{min} is 12.2 °C in winter, and max. temperature ϑ_{max} is 30.9 °C in summer according to ASHRAE (2013) implemented in the simulation software IDA ICE.

The domestic hot water (DHW) load profile for a day is modeled according to SIA 2024 (2015). The load profile does not change over the year. Tab. 1 shows the summary of the DHW demand where the max. power for DHW is calculated with 26.08 kW at 7 o'clock, whereby the total energy per day is calculated with 78.24 kWh/d.

Tab. 1: Details on the DHW demand for floor 1 to 8 according to SIA2024 (2015)

Name	Supply temperature in °C	Cold water temperature in °C	Floor area in m ²	DHW demand hot water in l/(per.day)	Spec. annually demand in kWh/(per.day)	Tot. annually demand ¹ in kWh
MFH	50	10	920.58	35	1.63	28.514

¹ Calculated with 6 persons each floor and 8 floors and a temperature difference of 40 K ($\vartheta_{dhw,sup}=50$ °C & $\vartheta_{cw}=10$ °C)

2.2 BUILDING

Abb. 1 to the left shows the local energy community with the demonstrator (tower with no. 10), the real building (middle) and the model with shadings in IDA ICE – simulation software (right). The room usage and heights can be found in Hengel et al. (2020).

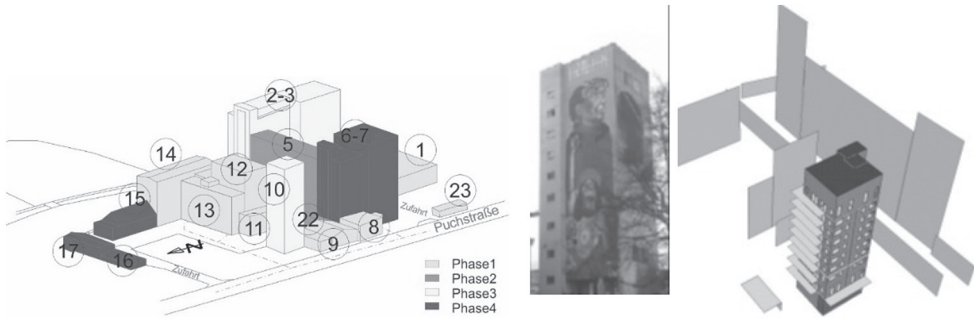


Abb. 1: Whole building complex Tagger-Area and buildings related to refurbishment phases one to four(left), photo of the real building (middle) as well as model of Turm 10 and its site shadings as well as balcony (right) (BAR 2021)

The multifunctional façade system (MFS) includes the innovative concept with an air gap in-between and a ferro-concrete (FC) wall with 21 cm, for floor 3 to 8. For floor 1, 2 and 9 the external wall consists of vertical coring bricks (VCB) with 30 cm (based on the concept B in Hengel et al. 2020). The analyzed MFS uses an active layer element that is always in between the existing external wall, e.g. FC or VCB or external plaster, and the attached insulation (cf. Abb. 2). The U-values without the active layers that are implemented in the simulation are show in Tab. 2.

Windows, ventilation system, infiltration and control strategy of the shadings as well as the temperature boundary condition of the stairway with 15 °C is taken from Hengel et al. (2020). As the office at floor 9 and café at the ground floor differs from the Hengel et al. (2020) a variable volume flow rate (VAV) based on presence of persons is assumed. The maximum flow rates are 1131 m³/h and 2178 m³/h for the office and café, respectively.

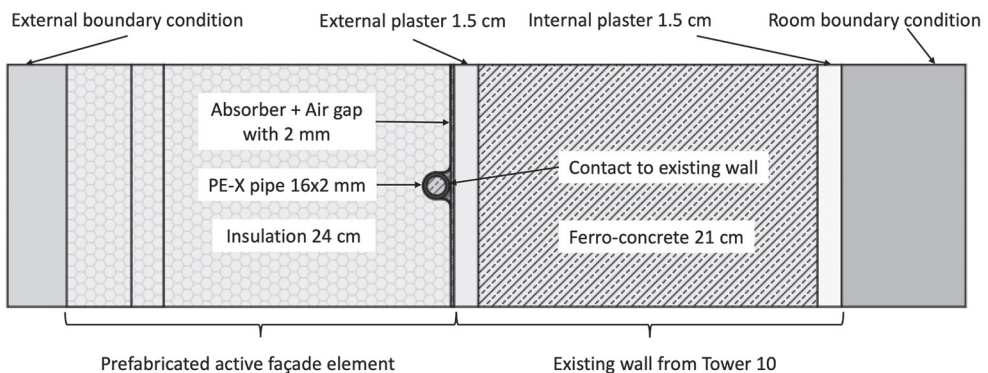


Abb. 2: Construction of the prefabricated active façade element with FC (Hengel et al. 2020)

The remaining control strategies concern the shading of windows and the day light in each room or in the office area as well as in the corridor and bath/WC.

Tab. 2: Properties of the walls with U-value, thickness and connecting rooms

No.	Name	total thickness in m	Tot. U-value ¹ in $W/(m^2 K)$	Assign to floor
1	External wall 1 with FC	0.475	0.15	3 rd to 8 th
2	External wall 2 with VCB	0.56	0.14	1 st , 2 nd and 9 th
3	External wall 3	0.235	3.40	Stairway outside
4	Internal wall 1	0.2	0.24	All internal walls except to stairway
5	Internal wall 2	0.38	0.24	Corridor/ bath to unheated stairway
6	Internal floor 1	0.3	0.62	All internal floors except among 2 nd to 3 rd
7	Internal floor 2	0.62	0.55	Internal floor between 2 nd & 3 rd
8	Roof	0.43	0.17	9 th floor to Roof
9	Floor	0.51	0.51	Slab towards ground

¹ Heat transfer coefficients according to IDA ICE set with $h_i=8 W/(m^2 \cdot K)$ and $h_o=25 W/(m^2 \cdot K)$ – only for overview, otherwise variable in dynamic simulation

The shadings of windows are closed if the solar radiation level exceeds $100 W/m^2$ at the outer surface of the window. The shading opens in case the solar radiation is lower than $100 W/m^2$ and the hysteresis. For the day light control strategy in the office 500 lx has always been maintained. If the daylight drops below 500 lx the artificial light is switched on to maintain 500 lx. For the rooms, bath and WC it is similar but that only 200 lx is used as setpoint and with presence of occupants. For the corridor 100 lx is assumed.

All inner loads – lighting, appliance, el. consumptions are based on the SIA2024 (2015) but the inner loads produced by occupants are different from a normal multi-family house as the number of persons per area is higher for the demonstrator. According to SIA2024 (2015) there is an area of $30 m^2$ for one person, but for this assumption there are 48 people on $920 m^2$, which results in about $19 m^2$ for one person. Due to this fact the area-specific heat gains from people is higher and calculated with about $20 kWh/(m^2 \cdot a)$ in contrast to literature which suggests about $9.5 kWh/(m^2 \cdot a)$ at an usual clothing and activity level. The assumption for the simulation features an activity level of 1.2 MET and a clothing factor of 1.0 in winter and 0.5 in summer. The room setpoints is set to $25 ^\circ C$ in summer and $22 ^\circ C$ in winter for the residential, office and café area except of corridor and bath WC with $18 ^\circ C$ and $24 ^\circ C$ respectively.

3. SYSTEM MODELLING

3.1 HEATING AND COOLING

Abb. 3 shows the system concept to reach PEB for the building tower 10. It is split in 3 categories, System 1, which concerns only the tower 10 as energy system, system 2 where the hydro power plant produces additional electricity, and system 3 where the whole area interacts with tower 10. But the goal is to already yield PEB with System 1 due to the innovative concept and not using the hydropower plant from system 2.

To provide heating or cooling energy a heat pump system with a water-well as source is modelled. The heat pump charges the DHW storage or the space heating (SH) storage that provides energy to the consumers. In summer cooling as Free-cooling, directly from the water-well is modelled and simultaneously cooling with DHW preparation is desired. To reach PEB for System 1, a building integrated PV (BiPV) on south and west directions of the building is installed. Surplus of the gained el. energy is sold to the power grid or stored to the battery (not considered here).

Abb. 4 shows the scheme of the hydronic system in detail with its design parameters. For the circulation pumps high efficiency pumps are assumed and the set points are 52 °C/48 °C for the storages DHW and SH, and 6 °C /12 °C for the cold storage. The heights of the Sensors are 10 % for DHW and SH, and 95 % for SC based on max. high of the tank (not optimized in this paper).

The linkage part between building and plant is the MFS with the active layer based on Hengel et al. (2020) (cf. Abb. 2). This active layer consists of an aluminum absorber/heat spreader with a thickness of 0.4 mm and a PEX pipe with 16x2 mm to transfer heat to or from the existing wall that conditions the room behind. According to BAR (2021) the middle pipe distances of the absorber is 12.5 cm with an overall heat transfer coefficient (HTC) of the MFS of 11.95 W/(m².K). This HTC value was determined via a parameter identification procedure comparing IDA ICE models and laboratory measurements. It shows that if the wall is not perfectly plain, the resulting HTC lies between the proposed values of the concepts HCP (A) and HCP air (B) in Hengel et al. (2020). A heat load calculation of the building with the design temperature by means of IDA ICE was carried out to design the MFS.

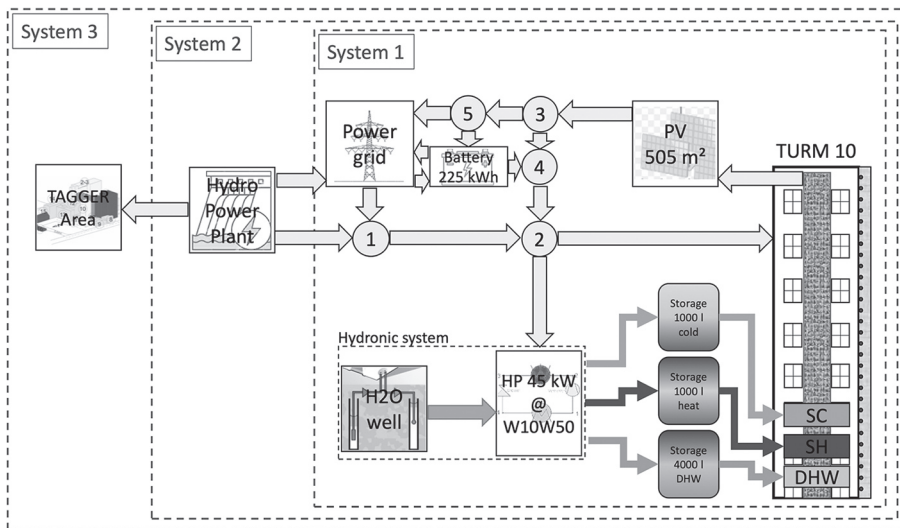


Abb. 3: Whole building complex Tagger-Area and buildings related to refurbishment phases one to four based on BAR (2021)

The results show that the worstcase room is located at the northeast corner in the 2nd floor – same room at 1st floor is quite similar – both floors feature higher share of windows than the remaining ones. Almost all rooms have design heating capacity between 400 W and 600 W or 15 W/m² to 20 W/m² based on the floor area. These results were rebased on the available wall area for each room. The max. specific design heating capacity is calculated with 30 W/m² (wall area) for all floors and 25 W/m² for the first floor to fulfil the comfort criteria. To maintain this heating capacity a supply temperature of 50 °C with a return temperature of 45 °C has been set for the heat pump system.

A similar process was done to get the design cooling capacity where the room at the 2nd floor shows the worst condition. The cooling capacity according to the design diagram shows a max. cooling power of 10 W/m² (for wall area with the construction vertical coring brick) at a mean average temperature difference of 7.5 K. This average temperature difference is the max. possible one to avoid condensation on the wall. For the construction ferro-concrete a design cooling capacity of 20 W/m² according to the design diagram is determined. As the design cooling demand cannot be reached with the active façade element it is just used with its max. cooling capacity. However, cooling of a residential building is not mandatory in Austria and therefore is not first level priority.

The distribution energy losses of the system are set to a “good” value called in IDA ICE. That means for DHW, heating and cooling a fixed value of 0.212 W/(m²) based on the floor area is used. This can be justified since the installation of the pipes and devices are new and well insulated.

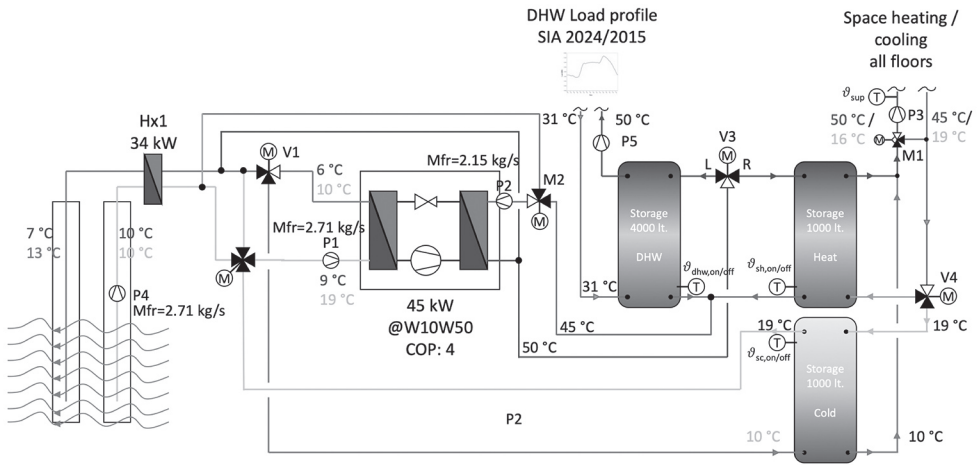


Abb. 4: Overall scheme of the hydronic system with heat pump, water-well as source, storages (DHW and SH and cold) and distribution system based on BAR (2021)

3.2 ENERGY PRODUCTION

To achieve the goal of a PEB a building integrated photovoltaic (BiPV) system is implemented in the simulation model BiPV1 and BiPV2 for west and south (cf. Tab. 3)

Tab. 3: Orientation and configuration of the BiPV

Name	Orient-ation	Number of modules	Panel Size in m ²	Tot area in m ²	Panel peak power in W	Panel efficiency in %	Inverter efficiency in %	Total PV system efficiency in %
BiPV1	West (251.1°)	230	1.421	326.83	240	16.9	98	16.6
BiPV2	South (161.1°)	136		193.26				

The electricity of the controller is assumed with 5 W per device and for 8760 h, and 9 controllers are applied for the overall systems with an energy demand of 394.2 kWh/a.

4. SIMULATION AND RESULTS

4.1 KPI AND CRITERIAS

The electricity consumption $W_{el,cons}$ is calculated for all devices, ventilation $W_{el,vent}$, pumps $W_{el,pu}$, controllers $W_{el,ctr}$, heat pump $W_{el,hp}$ that is used for both heating and cooling purposes, and electricity for lighting $W_{el,light}$ and appliances $W_{el,appl}$ and is defined in the equation 1.

$$W_{el,cons} = \int_{t=0}^{8760} (P_{el,vent} + P_{el,pu} + P_{el,hp} + P_{el,ctr} + P_{el,light} + P_{el,appl}) \cdot dt \quad (1)$$

To reach PEB goals the production of electricity $W_{el,prod}$ has to be higher than the total consumption. For system 1 the produced electricity by means of BiPV $W_{el,BiPV}$ is defined in equation 2.

$$W_{el,prod} = \int_{t=0}^{8760} (P_{el,BiPV}) \cdot dt \quad (2)$$

The total space heating energy demand of the pilot Q_{sh} is calculated as the energy provided to every zone/room also including the café and the office, the distribution and storage heat losses. The simulation for heating is done during the heating season, and for cooling not in the heating season resulting in a total cooling energy demand Q_{sc} including distribution and storage heat losses/gains. DHW energy demand Q_{dhw} is observed over the whole year also including heat losses for distribution and storage.

To meet the comfort criteria the room temperature (without corridors) must not undercut a temperature of 21 °C in the heating season and for DHW preparation the outlet temperature at the DHW storage must not undercut 45 °C to ensure a temperature level at tapping with about 38 °C. If the comfort criteria cannot be satisfied the simulation is excluded and has to be reconfigured with a proper setup.

4.2 REACHING PEB WITH VARIANT 1

With the attached prefabricated active façade element and the described hydronic system this chapter discusses the heating and cooling demand based on the definition of the KPIs. As also mentioned above the modelled net floor area is 1161.04 m² which is used to calculate the area specific values.

Tab. 4 shows the results for heating, cooling and DHW delivered energy over a year for the pilot.

Tab. 4: Results for heating, cooling and DHW energy demand over a year for the demonstrator

Q_{sh} in kWh	q_{sh} in kWh/m ²	Q_{sc} in kWh	q_{sc} in kWh/m ²	Q_{dhw} in kWh	q_{dhw} in kWh/m ²
23 738.7	20.45	39 219	33.78	27 549	23.73

As one can see the delivered heating energy is lower compared to the delivered cooling energy which leads to the conclusion that the inner loads especially the high numbers of persons, and the solar gains have a positive effect. Herein, a proper shading strategy has to be set to avoid high cooling energy demand. The high value of 23.73 kWh/m² for the DHW consumption can be justified by the high number of people (i.e. students) in less living space as in the standard SIA2024 (2015) assumed.

To reach the PEB status the electricity is important for the assessment. So, in Tab. 5 the electric energy consumption of all devices in the demonstrator is shown. The heat pump consumes the highest share of energy with about 47 MWh as it is responsible for heating and cooling, followed by the appliances, the ventilation and pumps and the artificial light in the demonstrator. The energy consumption of the controllers is just a very small part of the energy share.

Tab. 5: Results for electric energy consumption for the demonstrator

$W_{el,vent} + W_{el,pu}$ in kWh	$W_{el,hp}$ in kWh	$W_{el,ctr}$ in kWh	$W_{el,light}$ in kWh	$W_{el,appl}$ in kWh	$W_{el,cons}$ in kWh
7 837.7	47 045	394.2	4 779.8	12 680.7	72 737.4

The energy consumption for ventilation and pumps, artificial light and appliance match very well with the standard SIA2024 (2015), where specific values of 6.64 kWh/m², 4.05 kWh/m² and 10.75 kWh/m² (cf. Tab. 6) obtained from the simulations. In total an electric energy consumption of 72 737.4 kWh or 61.66 kWh/m² is calculated for the whole demonstrator.

Tab. 6: Results for specific electric energy consumption based on total net floor area for the demonstrator

$W_{el,vent} + W_{el,pu}$ in kWh/m ²	$W_{el,hp}$ in kWh/m ²	$W_{el,ctr}$ in kWh/m ²	$W_{el,light}$ in kWh/m ²	$W_{el,appl}$ in kWh/m ²	$W_{el,cons}$ in kWh/m ²
6.64	39.88	0.34	4.05	10.75	61.66

In contrast, the electricity production $W_{el,prod}$ of the BiPV it is about 62 MWh or 53.35 kWh/m² which is too low for system 1 to reach PEB.

4.3 REACHING PEB WITH VARIANT 2

Therefore, optimization runs and utilization of the thermal masses are carried out in another step. The setpoint for the storages of DHW are changed to 48 °C/44 °C in the storage, the SH setpoints are set to 42 °C/38 °C and the SC setpoint to 10 °C/14 °C. Also, a heating curve was implemented to linearly decrease supply temperature from 40 °C to 30 °C at an ambient temperature from 30 °C to +20 °C, respectively. And, the control strategy for the shading devices are changed to a setpoint of 70 W/m² to avoid overheating. Optimizing the setpoints for heating and cooling is possible as the high thermal masses can maintain room temperatures within the comfort range.

Tab. 7 shows the updated results with the new control strategies. The energy provided for the space heating is similar to the results beforehand while still fulfilling the comfort criteria. On the other hand, the space cooling energy decreases due to the new control strategy for the shading devices, and the DHW consumption decreases due to lower temperature differences as well, but remains high with 22.4 kWh/m² due to the high numbers of tenants in the building.

Tab. 7: Results for heating, cooling and DHW energy demand of the optimized scenario over a year for the demonstrator

Q_{sh} in kWh	q_{sh} in kWh/m ²	Q_{sc} in kWh	q_{sc} in kWh/m ²	Q_{dhw} in kWh	q_{dhw} in kWh/m ²
24 653	21.1	38 166	32,9	26 019	22.4

For the DHW preparation the storage temperature at the top of the store does not undercut 47 °C where the outlet to the tapping is located and hence fulfil the comfort criteria. For the room temperatures, Abb. 5 and Abb. 6 show that the min temperature in winter and max. temperature in summer where cooling takes place is in a good range with the comfort criteria. Max temperature in winter and min. temperature in summer were not observed since it can be easier handled by open the windows that was not implemented here.

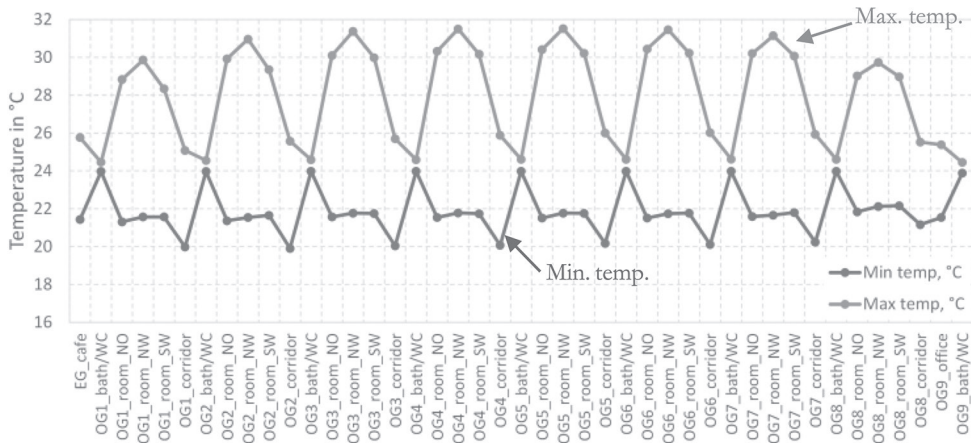


Abb. 5: Min. and max temperatures of each room in the demonstrator in the heating season of the optimized scenario (high temperatures can be neglected)

The updated electricity results, for the optimized scenario, are shown in Tab. 8 for their specific values. The energy production or gains are still the same as in the former scenario and it can be seen that with the optimized parameters and setpoints the PEB goal for the building can be reached as the electricity consumption can be reduced to 46.51 kWh/m² compared to a production of 53.35 kWh/m².

However, the impact by changing the setpoint is quite high as the heat pump can work with higher COPs and hence use less electricity. Also, less heat losses of the distribution system including the storage tanks takes place. In total the result shows minor savings for pumps and ventilation system but very high savings of the electricity coming from the plant system with the heat pump for heating and cooling.

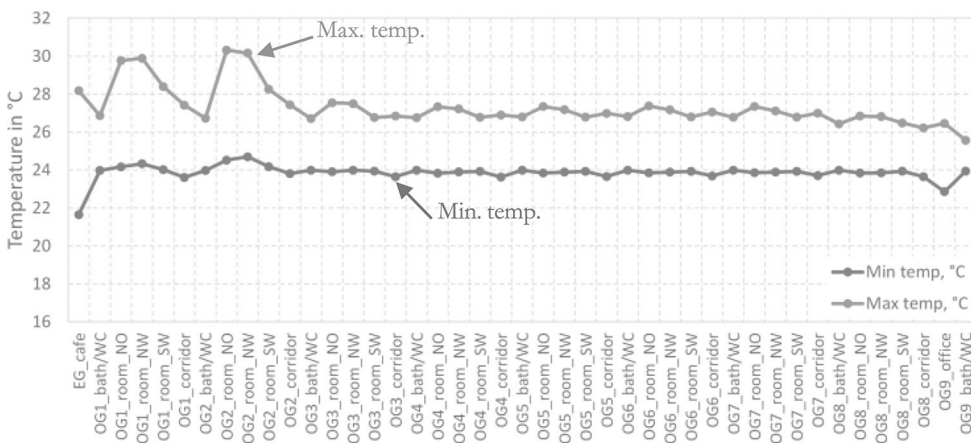


Abb. 6: Min. and max temperatures of each room in the demonstrator outside the heating season of the optimized scenario (low temperatures can be neglected)

It can be concluded that a lower temperature difference between the evaporation and condensation temperature has a huge impact to the electricity consumption of the system. The electricity demand for light and appliance remains approximately the same compared to the non-optimized case. The total electric energy consumption is calculated with around 54 MWh or 46.5 kWh/m² for the optimized scenario.

Tab. 8: Results for specific electric energy consumption based on total net floor area of the optimized scenario for the demonstrator

$W_{el,vent} + W_{el,pu}$ in kWh/m ²	$W_{el,hp}$ in kWh/m ²	$W_{el,ctr}$ in kWh/m ²	$W_{el,light}$ in kWh/m ²	$W_{el,appl}$ in kWh/m ²	$W_{el,cons}$ in kWh/m ²
6.23	25.33	0.34	4.21	10.41	46.51

5. SUMMARY AND CONCLUSION

Within this paper a simulation study with IDA ICE to reach PEB with an innovative multifunctional façade system is shown for a real residential building located in Graz. With some simplifications, a plant and building simulation was set up in IDA ICE and load profiles for the building were taken from literature, e.g. SIA2024 (2015). After the description of the boundaries and building model, the system and energy production is discussed (building integrated photovoltaic). The main part of the hydronic system was the water-to-water heat pump – with a water-well source – that provides heat for DHW, space heating, and for space cooling to the building. The latter ones use the innovative prefabricated active façade elements as dissipation system to transfer heat to the corresponding thermal zones. The design of the components was done with a heat load or cooling load calculation in IDA ICE. Firstly, for the simulations, an initial control strategy was set to fulfill the comfort criteria and to reach PEB.

However, the results show that the active façade elements cannot fulfill the cooling requirements since the heat transfer rate for cooling purposes – especially for vertical coring bricks – is too low. This issue has to be treated in a further study with an advanced control strategy, e.g. MPC

In contrast to this, during the heating season all comfort criteria can be fulfilled. The analysis shows that the minimum temperature does not undercut 21 °C, even for the vertical coring brick used for the external wall in the first and second floor. As mentioned, the restriction for this construction material is that the heat transfer rate is much lower compared to the ferro-concrete wall. The comfort criteria for DHW preparation is also fulfilled without difficulty.

The results are assessed with the defined KPIs and show that with the first set of temperature setpoints the goal of PEB cannot be reached due to too high electric energy consumption and too low electricity production with the BiPV. The mentioned hydropower plant is left out in this case as the electric energy production can also be provided for the whole area. However, with the optimized scenario the electric energy consumption could be reduced to reach PEB. This was found by decreasing the temperature setpoints for DHW preparation, space heating and space cooling under maintaining comfort criteria. The savings can be explained as the temperature difference between evaporation and condensation decreases and hence the COP and SPF of the heat pump increases.

However, some further research work has to be done e.g. to apply a proper control strategy for shading devices to reduce solar gains and hence reducing cooling capacity peaks and demands. Also, using a MPC strategy can be applied to utilize the potential of high thermal masses of the demonstrator for flexibility measures like demand side management.

ACKNOWLEDGEMENT

The research was supported by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program LC-EEB-03-2019 - New developments in plus energy houses (IA) under the project name EXCESS "FlexiBle user-Centric Energy poSitive houses" [grant number 870157]. The funding bodies had no such involvement in preparing the manuscript, methods and results etc.

LITERATUR

- ASHRAE 2013. Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ISBN 9781936504459
- BAR (2021) Information concerning demonstrator on the Austrian site provided by BAR Vermögensverwaltung GmbH from meetings, e-mails or discussions in 2021
- Energieagentur Steiermark (2016) Energieausweise erstellen – Anleitung -Hinweise – Empfehlungen, u-values from guideline, 6. edition, Graz, Austria
- EPBD 2010/31/EU (2010) DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings
- EPBD 2012/27/EU (2012) DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC
- EPBD 2018/844/ (2018) DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency
- EQUA (2021) IDA ICE simulation software for indoor climate and environment. EQUA Solution AB, Sweden
- Fink C., JähniG D., Ramschak T., Nocke B., Venus D., Höfler K., Ferk H., Mosing M., Fuchs G., Liebmingler C., Salg F., Urschler C., Schaffer B., Hainz M., Nussmüller W. (2017) Vorgefertigte Fassadenelemente mit maximal integrierten HVAC-Komponenten und -Systemen zur Bestandssanierung, final report Energieforschungsprogram e!Mission.at – 4. Ausschreibung
- Hengel F., Ramschak T., Gumhalter M., Venus D. (2020) Showing new concepts with thermal activated prefabricated façades for retrofitting residential Buildings In: Proceedings of BauSIM2020 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, 23-25 Sept. 2020, Graz University of Technology, Austria, pp. 20 – 27. DOI 10.3217/978-3-85125-786-1
- Höfler K., Geier S., Knotzer A., Venus D., Kreiner H., Passer A., Nussmüller W., Weiss T., Taschil V., Saurer J., Liebmingler C., Künz C., Brunnader A., Lutschounig K. (2012) e80^3 Subprojekt 3: Technologie- und Komponentenentwicklung. Leitprojekt: e80^3-Gebäude - Sanierungskonzepte zum Plus-Energiehaus mit vorgefertigten aktiven Dach- und Fassadenelementen, integrierter Haustechnik und Netzintegration. final report from Berichte aus Energie- und Umweltforschung 45/2013, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Vienna, Austria
- SIA2024 (2015). SIA 2024 2015. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik, Standard, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zurich, Switzerland

KONTAKTDATEN:

Franz Hengel
Feldgasse 19
A-8200 Gleisdorf
Email: f.hengel@ace.at

Sanierung von Geschoßwohnbauten mit thermisch aktivierten Fassaden – Bestimmung des Flexibilitätspotentials

M. Gumhalter, F. Hengel, T. Ramschak
AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

Abstract: The reduction of greenhouse gas (GHG) emissions that is mandated by the climate and energy framework of the European Commission is a challenging task for the building energy sector. Besides the switch to renewable energy sources, also the reduction of heat demand is essential on this behalf. The traditional housing renovation and thermal retrofitting processes are typically very labour intensive and therefore a big risk to the ambitious time schedule for GHG emission reduction. The key element of this study is an **innovative retrofitting approach** for multi storey residential buildings with the use of **prefabricated thermally active curtain facades**. Thereby the special focus lies on the dynamic behaviour of these systems during heating season. A variation study is conducted to show how the maximum design power of the included heating systems affect thermal comfort in a dynamic experiment. This shows on the one hand, that the actual necessary heating power is well below the design power based on normative regulations, and on the other hand, points out the large potential for flexibility measures.

1. EINLEITUNG

Der mit Frühjahr 2021 abermals verschärfte klima- und energiepolitische Rahmen der Europäischen Kommission fordert eine Verringerung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis zum Jahr 2030 von mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 (Europäische Kommission 2019). Demzufolge erhöht sich auch der Druck auf den österreichischen Gebäudesektor, welcher im Jahr 2018 für 10 % des heimischen THG-Ausstoßes verantwortlich war (Umweltbundesamt 2020). Um die große Diskrepanz zwischen der vorherrschenden Sanierungsrate im Wohnbau (1,4 % p.a. im Jahr 2018 (IIBW 2020a)) und den benötigten Sanierungsraten (ca. 2,6 % p.a. bis 2025, dann 3,2 % p.a. (IIBW 2020b)) zu verringern, werden schnelle und kosteneffiziente Sanierungslösungen von großer Bedeutung sein.

Im Rahmen dieser Studie wird eine Sanierungsmethode für mehrgeschossige Wohnbauten mithilfe von innovativen **vorgefertigten, thermisch aktiven Fassadenelementen** untersucht. Dabei liegt der Fokus auf unsanierten, großvolumigen Gebäuden mit dem Errichtungszeitraum zwischen 1960 bis 1980, da diese einerseits einen signifikanten Anteil am heimischen Wohnungsmarkt besitzen und nach Fink et al. (2017) hohe Energieverbräuche verursachen, sowie bauphysikalisch und architektonisch für die hier vorgestellten Methoden geeignet sind (Höfler et al. 2006; Hengel et al. 2020).

In Hengel et al. (2020) wurden die technischen, wirtschaftlichen und systematischen Vorteile von vorgefertigten Vorhangfassaden und fassadenintegrierten Heizsystemen dargestellt und die Methode erstmals theoretisch erfasst, simulationstechnisch evaluiert und ein Leitfaden zur Auslegung eines solchen neuartigen Systems erarbeitet. Dabei wurde gezeigt, dass die erreichten Wärmeübertragungsraten, bei gleichzeitiger Nachrüstung auf übliche, moderne Dämmstandards, ausreichen um den Wohnkomfort in den Gebäuden ohne zusätzliche Heizsysteme zu gewährleisten.

Eine inhärente Eigenschaft von fassadenintegrierten Heizsystemen ist die thermische Aktivierung der bestehenden Gebäudeaußenhülle, welcher bei den oben genannten Gebäudetypen eine große Wärmekapazität innewohnt. Betrachtet man nicht nur die möglichen Energieeinsparungen, sondern auch Flexibilitätspotentiale, die die Energieversorgung der Zukunft unweigerlich einfordern wird, dann zeigt die vorgestellte Sanierungsmethode erhebliche Stärken (Andrey et al. 2019).

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen in Hengel et al. (2020) und dem abgeschlossenen experimentellen Beweis der Funktion, als auch auf ein mit Messdaten validiertes Simulationsmodell, sollen weitere Analysen durchgeführt werden.

Da eine klassische Heizlastberechnung auf Basis von stationären extremen Umweltbedingungen oft eine Überdimensionierung des Heizsystems im realen Betrieb zur Folge hat und auch teilweise noch ein Sicherheitszuschlag der Auslegungsheizleistung eingerechnet wird, wird für den speziellen Fall der fassadenintegrierten Wärmeabgabesysteme genau diese Überdimensionierung quantifiziert. Dazu wird der Leitfaden zur Auslegung der fassadenintegrierten Heizsysteme nach Hengel et al. (2020) an den validierten Simulationsmodellen und einem virtuellen Demonstrationsgebäude angewandt. Von besonderem Interesse ist hierbei, wie sich die großen, thermisch aktivierten Massen im dynamischen Betrieb bemerkbar machen.

Einerseits sollen damit Überdimensionierungen von Heizsystemen vermieden werden, wo keine Flexibilität benötigt wird, und andererseits soll es ermöglicht werden das Flexibilitätspotential abzuschätzen, wenn es z.B. zur Einbindung von Wind- oder PV-Strom, aber auch anderer erneuerbarer Quellen gewünscht ist. Die Einhaltung der normativ geforderten Komfortkriterien muss in beiden Fällen jedoch jederzeit gewährleistet sein. Die Energieflexibilität ist mit Blick auf das Energiesystem der Zukunft, welches von volatilen Erzeugern geprägt sein wird, besonders hervorzuheben. Die somit generierten Informationen sollen auch derart aufbereitet werden, dass sie im Rahmen von weiterführenden Forschungen regelungstechnisch genutzt werden können, um mit aktivierten thermischen Speichermassen eine individuelle Lastverschiebung zu realisieren.

2. METHODIK

Das Hauptwerkzeug der methodischen Betrachtung ist die dynamische Gebäudesimulationssoftware IDA ICE mithilfe welcher sowohl das Demonstrationsgebäude als auch das validierte Modell der aktiven Fassaden abgebildet wird (EQUA 2021). Durch eine Variantenstudie wird bestimmt bis zu welcher Grenze die Flächenheizleistung reduziert werden kann, ohne dass im dynamischen Heizbetrieb Komfortbedingungen verletzt werden. Des Weiteren sollen daraus Erkenntnisse über mögliche Flexibilitätspotentiale gewonnen werden.

2.1 DEMONSTRATIONSGEBÄUDE

Abb. 1 zeigt eine 3D Darstellung und einen beispielhaften Grundriss des verwendeten Demonstrationsgebäudes, welches architektonisch und bauphysikalisch typisch für die Erbauungszeit zwischen 1960 und 1980 ist. Dieses wird einer hypothetischen Sanierung mithilfe der in Hengel et al. (2020) vorgestellten vorgefertigten aktiven Fassadenelemente unterzogen.



Abb. 1: Darstellung des verwendeten Demonstrationsgebäudes mit entsprechendem Grundriss welcher für alle drei Wohngeschoße ident ist.

Der in Abb. 2 gezeigte Querschnitt entspricht dem entstehenden Wandaufbau und in Tab. 1 sind weitere relevante Kennzahlen zu Hüllenteilen aufgelistet. Einer der Hauptvorteile der vorgestellten Sanierungsmethode ist der automatisch einhergehende Austausch von relevanten Gebäudehüllenteilen wie Fenster und Türen mit modernen Komponenten. Außenflächen wie Kellerdecken und oberste Geschößdecken, die nicht Teil der Fassade sind, werden passend zum Gesamtkonzept auch entsprechend dem Passivhaus-Standard saniert. Für die dynamischen Jahressimulationen werden die Anwesenheit von Personen und die entsprechenden internen Lasten laut der Norm SIA2024 (2015) berücksichtigt.

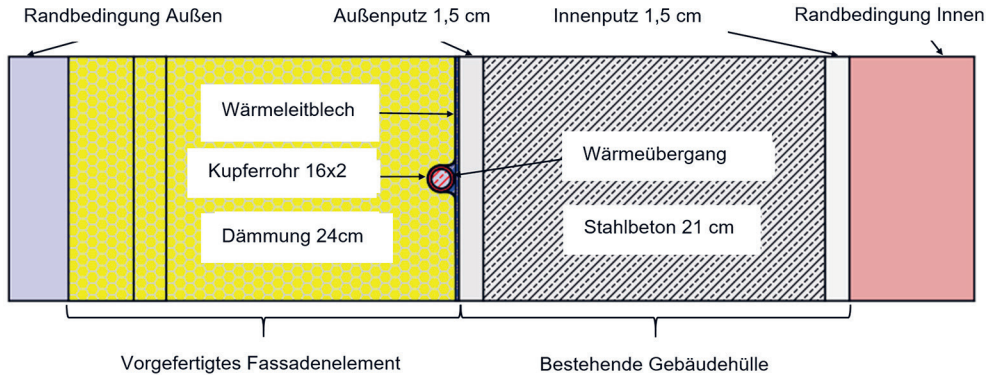


Abb. 2: Resultierender Wandaufbau nach einer Sanierung der Gebäudehülle mit den vorgefertigten aktiven Fassadenelementen (Hengel et al. 2020).

Tab. 1: Relevante Kennzahlen zur sanierten Gebäudehülle

Bauteil	U-Wert gesamt W/(m ² K)	Gesamtfläche m ²
Außenwand	0,15	392,7
Kellerdecke	0,17	227,4
Oberste Geschößdecke	0,11	236,1
Fenster (Glas)	0,6	107,2
Fenster (Rahmen)	2,0	30 % von Fensterfläche

2.2 DIMENSIONIERUNG DES FASSADENINTEGRIERTEN WÄRMEABGABESYSTEMS

Die Basis für alle weiteren Auslegungen und Vergleiche bildet eine statische Heizlastberechnung nach ÖNORM12831 (2018). Dazu wird die tiefste auftretende Jahrestemperatur mit $-12,2\text{ °C}$ für einen Standort im Süden von Graz laut der Norm ÖNORM8110 (2019) gewählt. Für die hier durchgeführten Untersuchungen sind die Zonen raumübergreifend an den Grenzen der Wohneinheiten ausgerichtet. Da für Wohn- und Schlafräume laut der oben genannten Norm eine operative Minimaltemperatur von 20 °C und für Badezimmer eine Temperatur von 24 °C vorgesehen ist, beide jedoch in einer Zone zusammengefasst sind, wurde für die raumübergreifenden Zonen eine Solltemperatur von 22 °C gewählt. Diese Unschärfe wird hier in Kauf genommen da der Fokus der Untersuchung

nicht auf detaillierten Komfortbetrachtungen, sondern auf dem thermischen Speicherverhalten des Gebäudes liegt. Angelehnt an das Standardverfahren zur Auslegung von Flächenheizsystemen laut ÖNORM1264 (2021) und mit der Zuhilfenahme des Auslegungsdiagramms nach Hengel et al. (2020) wird eine normgerechte Dimensionierung sichergestellt. Eine tabellarische Zusammenfassung der Auslegungsrechnung ist in Tab. 2 dargestellt, samt der gewählten Vorlauftemperaturen für die Heizkreise der jeweiligen Zonen.

2.3 VARIANTENSTUDIE

Da in modernen Wärmepumpen-betriebenen Heizungsanlagen einer der wichtigsten Faktoren für einen effizienten Betrieb die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator und ergo die Vorlauftemperatur darstellt, wird in dieser Studie die Auswirkung der gewählten Vorlauftemperatur auf das Wärmeabgabesystem erfasst. Die Vorlauftemperatur hat bei sonst unveränderten hydraulischen Bedingungen in den Heizkreisen eine direkte Auswirkung auf die mittlere Heizmittelübertemperatur und damit auch auf die maximal übertragbare Heizleistung. Eine Variation der maximal statisch übertragbaren Heizleistung kann auch mit geometrischen, physikalischen oder anderen hydraulischen Parametern erreicht werden. Die besondere Eignung der Vorlauftemperatur als Variable liegt jedoch in der Eigenschaft, dass sie auch in einer bereits realisierten Anlage meist weiterhin eine Variable darstellt und nicht wie andere Kenngrößen, zumeist konstruktiv festgelegt sind. Dies ermöglicht eine direkte Verwertung der Simulationsergebnisse für Optimierungen im Betrieb und nicht nur im Auslegungsprozess.

Tab. 2: Ergebnisse der Auslegungsrechnung

Geschoß	Raum	Heizlast laut ÖNORM 12831 (2018) W	Solltemperatur °C	aktivierte Wandfläche m ²	benötigte spezifische Heizleistung W/m ² _{wand}	Benötigte Vorlauftemperatur °C	Temperatur Spreizung im Auslegungsfall K	Rücklauf Temperatur °C
EG	EG_1	1285	22	49,29	26,1	46	19	27
EG	EG_2	646,7		13,17	49,1		11	35
EG	EG_3	646,0		13,17	49,1		11	35
EG	EG_4	1272,0		48,62	26,2		19	27
OG1	OG1_1	1255,0		49,29	25,5		19	27
OG1	OG1_2	630,8		13,17	47,9		11	35
OG1	OG1_3	630,0		13,17	47,8		11	35
OG1	OG1_4	1243,0		48,62	25,6		19	27
OG2	OG2_1	1510,0		49,29	30,6		19	27
OG2	OG2_2	777,7		13,17	59,1		5	41
OG2	OG2_3	776,8		13,17	59,0		5	41
OG2	OG2_4	1493,0		48,62	30,1		19	27

Das Demonstrationsgebäude mit den nach Kapitel 2.2 ausgelegten Wärmeabgabesystemen wird zwei grundlegend verschiedenen Simulationen unterzogen. Ein statischer Heizfall, welcher die gleichen Randbedingungen umfasst, wie sie auch bei der Heizlastberechnung nach ÖNORM12831 (2018) festgelegt sind und einer dynamischen Jahressimulation in der ein ASHRAE Standardklimatensatz für GrazThalerhof Flughafen verwendet wurde. Als Basisszenario dient stets der normgerechte Auslegungsfall der Wärmeabgabesysteme im Demonstrationsgebäude, welcher eine Vorlauftemperatur von 46 °C vorsieht. Ausgehend davon wird die Vorlauftemperatur in 2 K Schritten bis auf 28 °C verringert. Im folgenden Kapitel werden die dabei gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

3. ERGEBNISSE

Als maßgebliche Kenngröße für die Evaluierung des Heizsystems wird die auftretende operative Zonentemperatur herangezogen. Für die oben beschriebene Variantenstudie werden in Abb. 3 die errechneten Minimalwerte aller Zonen mit deren Streuung dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass im linken Diagramm die stationären Endwerte der operativen Temperaturen in den Zonen abgebildet sind und im rechten Diagramm die jeweilig auftretenden Minima im Jahresverlauf. Ein Vergleich der beiden Abbildungen führt zu drei Schlussfolgerungen:

- Die in Hengel et al. (2020) vorgestellte Methode zur Auslegung der thermisch aktiven Fassaden gewährleistet die Einhaltung der geforderten Temperaturen im Heizlastfall und in weiterer Folge auch im dynamischen Experiment.
- Nicht optimales Regelverhalten verursacht eine geringfügige Unterschreitung der Solltemperaturen im dynamischen Experiment, selbst, wenn die vorhandene Heizleistung ausreichend ist. Dieser Umstand wird in Kapitel 3.1 genauer untersucht.
- Im Gegensatz zum statischen Heizfall werden in einer dynamischen Simulation die operativen Temperaturen auch für stark reduzierte Vorlauftemperaturen noch eingehalten. Dieses Verhalten kann unter anderem durch die große aktivierte thermische Speichermasse erklärt werden, die bei zeitlich begrenztem Auftreten von Extremtemperaturen Wärme abgibt und damit das Heizsystem unterstützt. Eine detaillierte Betrachtung dazu bietet Kapitel 3.2.

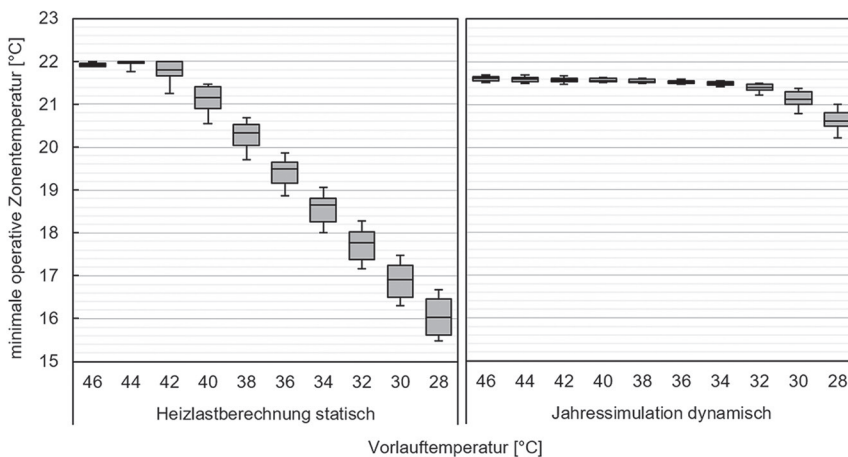


Abb. 3: Gegenüberstellung der minimal auftretenden Temperaturen in den einzelnen Zonen des Gebäudes über die jeweilige Vorlauftemperaturen. Links für einen statischen Heizlastfall und rechts für eine dynamische Jahressimulation.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Reduktion der maximal übertragenen Heizleistung im **statischen** Fall gleichwertig mit der Veränderung von anderen physikalischen oder geometrischen Parametern (z.B. einer Flächenreduktion) erreichen lässt. Die direkte vergleichende Interpretation der **dynamischen** Ergebnisse ist dafür allerdings nicht zulässig, da sich z.B. bei einer Reduktion der Aktivierungsfläche nicht nur die übertragbare Leistung verändert, sondern auch die aktivierte Bauteilmasse.

3.1 EINFLUSS DES REGELVERHALTENS

Durch die dynamische Trägheit des Systems neigen die hier eingesetzten PI-Regler zu schwingendem Verhalten und sind somit für einen Teil der Temperaturunterschreitungen verantwortlich. Außerdem bietet sich bei der Bewirtschaftung der Speichermassen die Möglichkeit prädiktiv auf kalte Außentemperaturen zu reagieren. Um sowohl den Einfluss der nicht optimalen konventionellen Regler abzugrenzen und das Potential für den Einsatz von prädiktiven Reglern abzuschätzen, wurde eine weitere Versuchsreihe mit einer operativen Solltemperatur von 24 °C durchgeführt. Dies soll Erkenntnis darüber bringen, unter welchen Umständen selbst ein Dauerbetrieb der Heizung eine Temperaturunterschreitung nicht mehr verhindern kann. Die in Abb. 4 dargestellten Jahresdauerlinien zeigen die operativen Temperaturen in der kältesten Zone (OG2_4) für die variierte Vorlauftemperatur T_{vl} und die Regler-Solltemperaturen T_{sp} von 22 °C und 24 °C. Besonderes Augenmerk kann dabei auf die Datenreihe $T_{sp} = 24$ °C; $T_{vl} = 34$ °C gelegt werden, da diese die kleinste Vorlauftemperatur darstellt bei der keine Verletzung der 22 °C Grenze auftritt. Die maximal notwendige Vorlauftemperatur kann für das verwendete Demonstrationsgebäude unter der Annahme einer geeigneten Regelung somit auf 34 °C eingestellt werden, was eine erhebliche Reduktion der Primärenergie im Vergleich zum normgerechten Auslegungsfall (46 °C) bringt. Dies resultiert typischerweise in verringerten Verlusten, einer erhöhten Wärmepumpeneffizienz und kann eine erhebliche Kostenreduktion in der Auslegung bringen. Wie bei Heizsystemen üblich, kann auch noch eine Außentemperatur abhängige Verringerung der Vorlauftemperatur eingeführt werden um weitere Energie einzusparen.

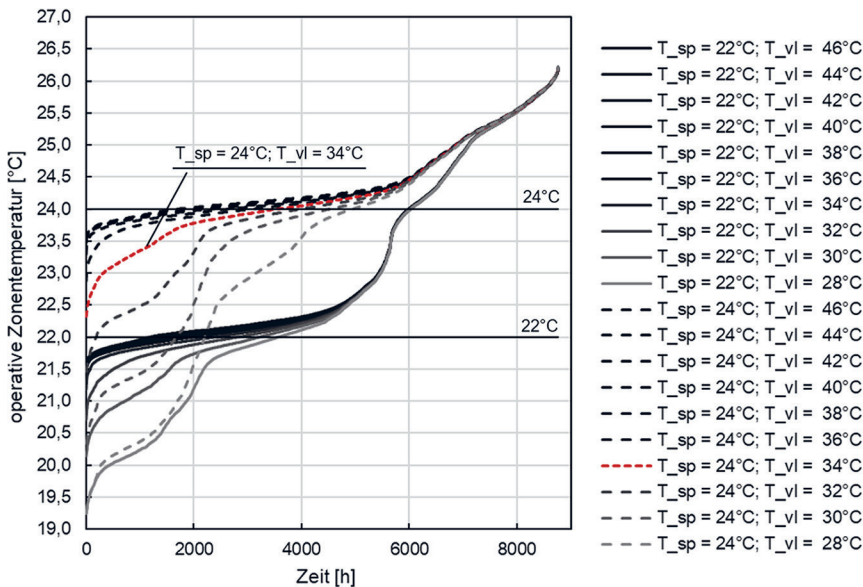


Abb. 4: Jahresdauerlinien der operativen Zonentemperaturen der kältesten Zone für verschiedene Vorlauftemperaturen (T_{vl}) und Regler-Solltemperaturen (T_{sp}) mit Ziel die Komfortkriterien einzuhalten.

3.2 DYNAMISCHES VERHALTEN IM DETAIL

Um das zuvor bereits beschriebene Speicherverhalten weiter zu evaluieren und das vorhandene Flexibilitätspotential darzustellen, wird beispielhaft die Wärmebilanz der kritischsten Zone (OG2_4) untersucht. Der dargestellte Zeitraum umfasst die kälteste Woche der Jahressimulation mit einer minimalen Außentemperatur von $-14,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Datenreihe *Local Heating Units* (diagonal schraffiert) stellt in Abb. 5 und Abb. 6 jeweils die von der aktiven Fassade abgegebene Wärmeleistung dar. In Abb. 5 ist die Heizebene laut Norm ausgelegt und zeigt, wie auch schon in Kapitel 3.1 beschrieben ein oszillierendes Regelverhalten. Durch die transienten Vorgänge ist die Heizleistung des Wärmeabgabesystems auch größer als die Auslegungsleistung, dafür allerdings nur ca. die Hälfte der Zeit aktiviert. Die Wärme wird währenddessen weitestgehend homogen von den Wänden in die Zone abgegeben.

Vergleicht man dieses Verhalten mit dem in Abb. 6 dargestellten Fall, welcher in Kapitel 3.1 als kleinster möglicher Auslegungsfall bestimmt wurde, kann dort auch eine konstante Leistungsabgabe in der Heizebene festgestellt werden. Bei einer insgesamt ähnlich großen gelieferten Energiemenge muss die Anlage nur in etwa die halbe Spitzenleistung bereitstellen und kann in einem verschleißmindernden Dauerbetrieb verharren. Die Einhaltung der Komfortbedingungen ist in beiden Fällen gegeben.

Im Umkehrschluss muss allerdings auch auf das Flexibilitätspotential hingewiesen werden, welches im Fall der Normauslegung für Abb. 5 selbst in der kritischsten Zone in der kältesten Woche vorhanden ist. Die hier dargestellten Heizzyklen können aufgrund der großen zeitlichen Pufferwirkung auch mehrere Stunden zeitlich verschoben werden ohne die Bewohner zu beeinträchtigen. Durch eine minimale Auslegung wie in Abb. 6 dargestellt, besteht diese Flexibilität zumindest in diesem Extremszenario nicht mehr und das Heizsystem ist auf einen durchgehenden Betrieb angewiesen. Dieser Umstand muss speziell bei der Systemauslegung berücksichtigt werden, um später alle gewünschten Betriebszustände zu ermöglichen. Eine Realisierung, bei der die Vorlauftemperatur auch im späteren Betrieb dynamisch durch externe Signale veränderbar ist, könnte je nach Bedarf auch einen variablen Flexibilitätsgrad liefern.

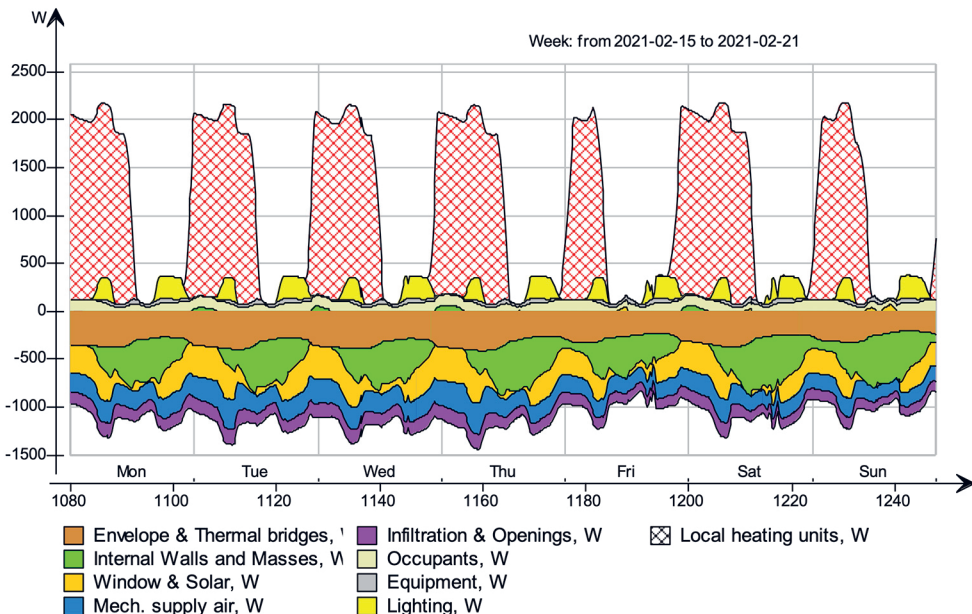


Abb. 5: Wärmebilanz der Zone OG2_4 für die kälteste Woche des Jahres und eine Vorlauftemperatur von $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ dargestellt als gestapelte Flächen (für Legende siehe Abb. 6).

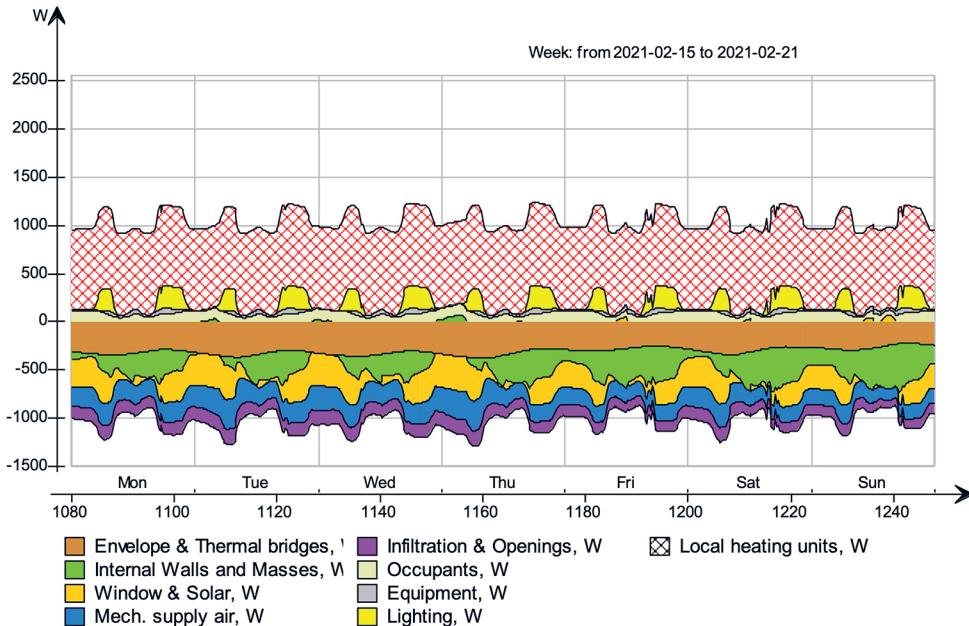


Abb. 6: Wärmebilanz der Zone OG2_4 für die kälteste Woche des Jahres und eine Vorlauftemperatur von 34 °C dargestellt als gestapelte Flächen.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Das Auslegungsverfahren für vorgefertigte, thermisch aktive Fassadenelemente nach Hengel et al. (2020) ermöglicht eine normgerechte Auslegung der integrierten Heizebenen mit ähnlichen Werkzeugen wie sie von anderen Flächenheizsystemen bekannt sind.

Die nötigen Heizmitteltemperaturen für die hier vorgestellte thermisch aktive Fassade sind im Vergleich zu anderen Flächenheizsystemen (Fußboden-Estrichheizung, Decken-Betonkernaktivierung) in keinem signifikanten Ausmaß erhöht. Anders als die normgerechte Auslegungsrechnung auf Basis von statischen Extremtemperaturen erwarten lässt, differenziert sich die tatsächliche dynamisch benötigte Vorlauftemperatur nur um 1 K von der des Auslegungsfalles für eine klassische Fußbodenheizung (ausgelegt nach ÖNORM1264 (2021) für das verwendete Demonstrationsgebäude).

Mit der erheblichen thermischen Speicherwirkung, die durch die Aktivierung der Fassadenflächen genutzt werden kann, ist es auch an kalten Wintertagen möglich die Heizleistung über den Tagesverlauf zu glätten. Dies ermöglicht in dem hier dargestellten Demonstrationsfall eine Reduktion der benötigten Spitzenheizleistung um ca. 50 %. In diesem Fall wird an den kältesten Tagen des Jahres jedoch ein durchgehender Betrieb der Heizungsanlage benötigt und es verbleibt wenig bis kein Potential für Lastverschiebungen.

Fortgeschrittene modellbasierte Regelmethoden könnten nicht nur die Trägheit des Heizungssystems kompensieren, sondern durch gezielte Veränderung der Vorlauftemperatur auch die Charakteristik des Systems verändern. Der Inhalt von weiterführenden Forschungen wird sich daher auch um die Frage drehen, wie mit Systemen dieser Art, große temporäre Energieüberschüsse eingespeichert werden können.

DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des European Union's Horizon 2020 research and innovation program LC-EEB-03-2019 - New developments in plus energy houses (IA) unter dem Projekt EXCESS "Flexible user-Centric Energy positive houseS" [grant number 870157] unterstützt. Die Förderstellen waren thematisch nicht in die Wahl der Methoden, Darstellung der Ergebnisse oder Erstellen dieses Manuskripts involviert.

LITERATUR

- Europäische Kommission (2019) MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Der europäische Grüne Deal, COM(2019) 640 final
- Umweltbundesamt (2020) Klimaschutzbericht 2020, S. 59, REP-0738, ISBN 978-3-99004-558-9
- IIBW (2020a) Definition und Messung der thermisch-energetischen Sanierungsrate in Österreich (Wien: IIBW, Umweltbundesamt, im Auftrag der Verbände: FBI, GDI2050, WKO, ZIB)
- IIBW (2020b) Impact Assessment von Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Wohnungssektors (Wien: IIBW, im Auftrag des Nachhaltigkeitsministeriums)
- Hengel F., Ramschak T., Gumhalter M., Venus D. (2020) showing new concepts with thermal activated prefabricated facades for retrofitting residential building, BauSim 2020 Graz
- Höfler K., Geier S., Knotzer A., Venus D., Kreiner H., Passer A., Nussmüller W., Weiss T., Taschil V., Saurer J., Liebming C., Künz C., Brunnader A., Lutschoung K. (2012) e80³ Subprojekt 3: Technologie- und Komponentenentwicklung. Leitprojekt: e80³-Gebäude - Sanierungskonzepte zum Plus-Energiehaus mit vorgefertigten aktiven Dach- und Fassadenelementen, integrierter Haustechnik und Netzintegration. final report from Berichte aus Energie- und Umweltforschung 45/2013, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Vienna, Austria
- Fink C., Jähniq D., Ramschak T., Nocke B., Venus D., Höfler K., Ferk H., Mosing M., Fuchs G., Liebming C., Salg F., Urschler C., Schaffer B., Hainz M., Nussmüller W. (2017). Vorgefertigte Fassadenelemente mit maximal integrierten HVAC-Komponenten und -Systemen zur Bestandssanierung, final report Energieforschungsprogram e!Mission.at – 4. Ausschreibung
- Andrey C., Fournié, Gabay M., de Sevin, H. (2019) METIS Studies, Study S07 - The role and need of flexibility in 2030: focus on energy storage, This study was ordered and paid by the European Commission, ISBN: 978-92-76-03428-5
- SIA2024 (2015) SIA 2024 2015. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik, Standard, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zurich, Switzerland
- EQUA (2021) IDA ICE simulation software for indoor climate and environment. EQUA Solution AB, Sweden
- ÖNORM12831 (2018) ÖNORM H 12831-1:2018 01 15 Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Nationale Festlegungen und nationale Erläuterungen zu ÖNORM EN 12831-1
- ÖNORM8110 (2019) ÖNORM B 8110-5:2019 03 15 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile
- ÖNORM1264 (2021) ÖNORM EN 1264-3:2021 08 01 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 3: Auslegung

KONTAKTDATEN:

Michael Gumhalter

AEE INTEC

Feldgasse 19

8200 Gleisdorf

Email: m.gumhalter@aec.at

Energy²POG: Eine grüne Oase am Pogusch

K. Höfler, T. Weiß, F. Hengel, W. Wagner

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich

H. Reitbauer

Steirereck GmbH, Wien, Österreich

R. Pichler

TBH GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: Inns and restaurants have an energy cost share of approx. 6 % of turnover, hotels of approx. 4 % (BMFW 2015). Energy consumption in hotels and restaurants is a decisive production factor that causes high costs and CO₂ emissions. Following deficits are present at the moment:

- Only few innovative implementations in the area of energy and sustainability in hotels and tourism facilities exist.
- Complex energy and resource flows.
- Usually, individual components (energy, building materials, food, mobility, etc.) are considered separately. Synergy potentials are not exploited.
- Hardly any consumption data are available for all resource flows in the food service industry.

Using the example of the “Steirereck - Pogusch” gastronomy and hotel project, a plus-energy ensemble were to be created by energetic and ecological optimization measures of the existing buildings in combination with the planned new construction.

The aim of the project was the conception, optimization and demonstration of a hybrid energy supply system optimized for operational material flows for a restaurant and hotel business in an exposed location. The concept enables the integration of operational material flows into the heat and energy supply system.

There is no doubt that residential and similar buildings have the highest potential for the implementation of sustainability goals. But it is shown that special buildings, such as hotels and tourism facilities, have high energy saving potentials on the one hand and can contribute significantly to the dissemination of plus energy buildings and innovative technologies - especially the applied demo project - on the other hand.

Using the example of the “Steirereck - Pogusch” gastronomy and hotel project, a plus-energy ensemble was to be created by energetic and ecological optimization measures of the existing buildings in combination with the planned new construction. It were to be shown that a (nearly?) energy-self-sufficient, resource saving tourism project in “island position” can be realised by a comprehensive bundle of measures. The measures focus on operating energy (heating, cooling, electricity), supplemented by measures to reduce resource consumption (local food production, recycling management - composting, selection of ecological building materials) and measures to reduce mobility-related energy and CO₂ consumption (electro mobility).

For the visitors and guests of the hotel project “Steirereck - Pogusch” the entire measures and consumption data are prepared and presented in the form of an energy educational trail. Due to the high national and international awareness level of the company “Steirereck - Pogusch” (guests include important representatives from politics, administration, business and society), the research project has high dissemination potential and multiplication effects.

1. EINLEITUNG

Gasthöfe und Restaurants weisen einen Energiekostenanteil am Umsatz von ca. 6 % auf, Hotels von ca. 4 % (BMWFV 2015). Der Energieverbrauch in der Hotellerie und Gastronomie ist ein entscheidender Produktionsfaktor, der hohe Kosten und CO₂-Emissionen verursacht. Es steht außer Zweifel, dass wohn- und wohnähnliche Gebäude das höchste Potential zur Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen haben, es zeigt sich jedoch, dass Sondergebäude, wie Hotels und Tourismuseinrichtungen einerseits hohe Energieeinsparungspotenziale besitzen und andererseits wesentlich zur Verbreitung von Plus-Energiegebäuden und innovativen Technologien – speziell Demoprojekte – beitragen können. Derzeit gibt es noch wenige innovative Umsetzungen im Bereich Energie- und Nachhaltigkeit bei Hotels und Tourismuseinrichtungen.

Der Pogusch ist ein 1059 Meter hoher Alpenpass in der Obersteiermark. Auf der Passhöhe befindet sich das Wirtshaus „Steirereck am Pogusch“ mit seinem Hauptgebäude und einigen Nebengebäuden.

Vorrangiges Ziel des Projekts „Energy²POG“ war die Neuausrichtung des Standortes „Steirereck am Pogusch“ und Errichtung eines nachhaltigen und ressourcenschonenden Leuchtturmprojektes auf über 1000 Metern Seehöhe. Die dem Projekt zugrundeliegende Idee ist der Einsatz von Solarenergie, regionaler Biomasse und passiven Komponenten zum Plusenergiegebäudeverband an einem Standort mit hoher ökologischer Sensibilität. Der „Hybride Energieverbund“ basiert auf dem Zusammenspiel und Optimierung unterschiedlichster erneuerbarer Energiesysteme. Das daraus resultierende Energiekonzept berücksichtigt bereits bestehende Strukturen wie auch neu zu errichtende Systeme und fasst dies in einer einzigartigen Gesamtsystemlösung zusammen.

Das umgesetzte Energiekonzept ermöglicht die Erreichung eines Plus-Energie Standards für das gesamte Areal Steirereck am Pogusch.

Seit Jahren pflegt das „Steirereck am Pogusch“ die Einbeziehung und Nutzung der lokalen personellen und materiellen Ressourcen. Die Fertigung von Komponenten aus eigener Produktion, Wiederverwendung von Bauteilen und Möbeln durch Instandsetzung, Einsatz von nachhaltigen, langlebigen Bau- und Möbelmaterialien sowie Verwendung von regionaler Biomasse gehören zum fixen Bestandteil des beruflichen Alltags.

Vorrangiges Ziel des Projekts „Energy²POG“ war die Neuausrichtung des Standortes „Steirereck am Pogusch“ und Errichtung eines nachhaltigen und ressourcenschonenden Leuchtturmprojektes auf über 1000 Metern Seehöhe. Die dem Projekt zugrundeliegende Idee ist der Einsatz von Solarenergie, regionaler Biomasse und passiven Komponenten zum Plusenergiegebäudeverband an einem Standort mit hoher ökologischer Sensibilität. Der „Hybride Energieverbund“ basiert auf dem Zusammenspiel und Optimierung unterschiedlichster erneuerbarer Energiesysteme. Das daraus resultierende Energiekonzept berücksichtigt bereits bestehende Strukturen wie auch neu zu errichtende Systeme und fasst dies in einer einzigartigen Gesamtsystemlösung zusammen.

Das Projekt brachte kleine- bis mittelgroße Eingriffe in das gastronomische Angebot mit sich und große Veränderungen im Hinterland sowie Umsetzungen neuer landwirtschaftlicher Visionen. Letzteres manifestiert sich durch das Betreiben einer nachhaltigen Landwirtschaft zur teilweisen Selbstversorgung mit Nahrungsmitteln (Obst und Gemüse aus Freiflächen und Glashäuser).

Weiters ist durch das neu umgesetzte Energiekonzept sowie das Revitalisierungskonzept für den vorhandenen Altbestand nun eine optimale Nutzung aller verfügbaren Ressourcen möglich (je nach Bausubstanz und Kosten mit weitgehend ökologischen Baustoffen und Materialien). Auch eine größtmögliche Abnabelung von verschiedenen Energielieferanten durch eigene Erzeugung von Strom und Wärme wurde umgesetzt, um so das Ziel der Energieautarkie & Ressourcenschonung umzusetzen.

2. INHALTE UND ERGEBNISSE

2.1 INNOVATIVES GEBÄUDEKONZEPT

Das Projekt besteht aus diversen Bestandsgebäuden (Steinhaus, Holzhaus, Salettl und Heizhaus), welche teilweise abgebrochen, hochwertig saniert und durch Zubauten erweitert werden. Die geplanten Zubauten sind aufgrund der vorhandenen Hanglage teilweise eingegraben und somit energetisch optimiert.

Ziel des baulichen Konzepts waren ressourcenschonende, energieeffiziente Bauweise (u. a. hoher Dämmstandard und optimale Zonierung der beheizten Bereiche sowie die achtsame Revitalisierung und optimale Nutzung der Bestandsgebäude. Küche, Beherbergung, Steinhaus, Holzhaus und Landwirtschaft wurden erweitert und mit neuen Elementen (u.a. zwei Glashäuser sowie spezielle Gebäude für die Mitarbeiterinnen und Gästeunterbringung wie z.B. Baumhäuser) ergänzt. Durch diese unterschiedlichen zurückhaltenden Eingriffe bilden Bestandsgebäude und Zubauten ein dörfliches Ensemble im Maßstab der ländlichen Bebauung (Abb. 1 und Abb. 2).

Die neuen Gebäude wurden im Niedrigenergiestandard unter teilweiser Nutzung von Passivhauskomponenten ausgeführt.



Abb. 1: Lageplan (PPAG 2019)

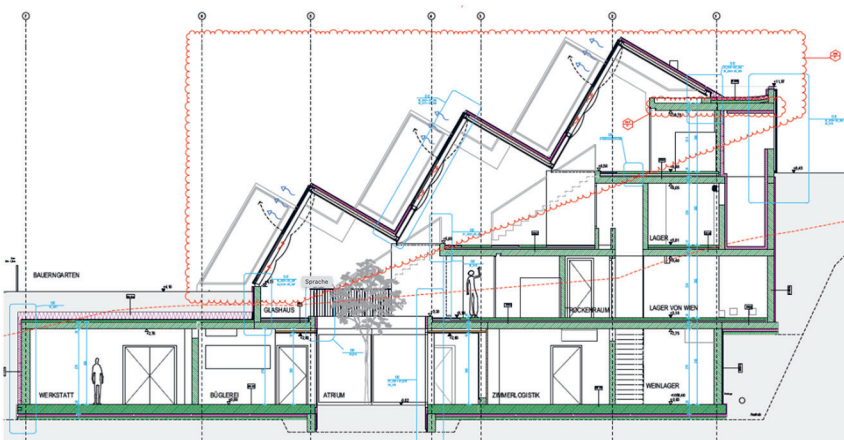


Abb. 2: Schnitt Glashaus kalt (PPAG 2019)

2.2 INNOVATIVES ENERGIEKONZEPT

Der „Hybride Energieverbund“ basiert auf dem optimalen Zusammenspiel unterschiedlichster erneuerbarer Energiesysteme. Das umgesetzte Energiekonzept berücksichtigt bereits bestehende Strukturen, wie auch neu errichtete Systeme, und fasst diese in einer Gesamtsystemlösung zusammen.

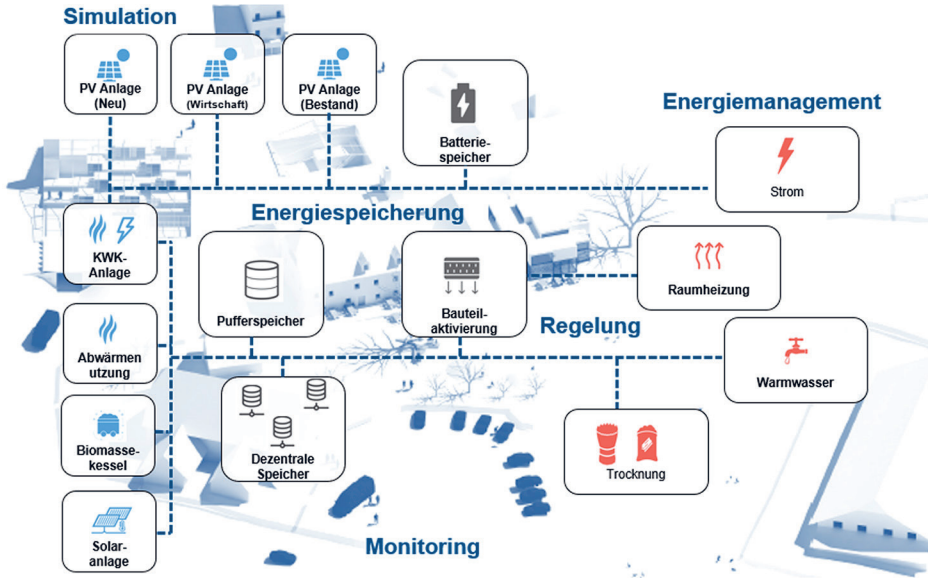


Abb. 3: Darstellung Energiekonzept (AEE INTEC)



Abb. 4: Ansicht Haustechnikverteilerzimmerraum (Steirereck GmbH)

Das umgesetzte Energiekonzept ermöglicht die Erreichung eines Plus-Energie Standards für das gesamte Areal Steirereck am Pogusch.

Dabei lag der Fokus explizit auf den spezifischen Rahmenbedingungen einer Lage auf rund 1000 Metern Seehöhe, insbesondere was die Nutzung der vor Ort verfügbaren erneuerbaren Energiequellen betrifft. Zentral war dabei, dass die bereits bestehenden Versorgungsanlagen (150 kW Hackgutanlage, 100 m² Solarthermieanlage und eine 5 kWp Photovoltaikanlage) im neuen Gesamtkonzept, die Basis bilden und im intelligenten Zusammenspiel mit den neuen Elementen die Erreichung des Plus-Energie-Standards ermöglichen.

Die konsequente Umsetzung von kontrollierten Be- und Entlüftungsanlagen inkl. Wärmerückgewinnung zählen zum Ausführungsstandard. Die Wärmeabgabe erfolgt auf Basis von Niedertemperatursysteme (z.B. Fußboden- und Wandheizung sowie einer umfangreichen Bauteilaktivierung der Boden und Deckenflächen). Die Gewächshäuser wurden thermisch hochwertig ausgeführt und strikt in einen moderat beheizten Teil und in einen gering temperierten Teil getrennt.

Die Bestandsgebäude sind thermisch in einem guten Zustand (ca. 50-70 kWh/m²a) und größtenteils auch schon mit kontrollierter Be- und Entlüftungsanlage inkl. Wärmerückgewinnung ausgestattet.

Weder Bestandsgebäude noch Neubauflächen werden aktiv klimatisiert, stattdessen werden die natürlichen klimatischen Gegebenheiten auf einer Seehöhe von 1000 Metern herangezogen, um die Frischluft vorzukonditionieren (z.B. Lufterdollektor) bzw. im Sommer die kühle Außenluft zur Auskühlung der Speichermasse zu nutzen.

Neu errichtete erneuerbare Erzeugungsanlagen nahe Null-Energie Standard bedeutet eine bilanzielle Versorgung des Areals Steirereck am Pogusch über ein Jahr zu 100 Prozent aus vor Ort erzeugter erneuerbarer Energie. Dabei galt es eine netzdienliche bzw. netzentlastende Betriebsweise als Notwendigkeit mit zu berücksichtigen, sprich nicht das übergeordnete Stromnetz als Problemlöser für ein zeitliches Missverhältnis zwischen Erzeugung und Verbrauch zu benutzen (Stromspeicher).

Eine weitere Voraussetzung für die neuen Versorgungselemente war eine synergetische Kombinierbarkeit mit den bestehenden Versorgungsanlagen. Basierend auf den vor Ort verfügbaren erneuerbaren Energiequellen (Sonnenenergie, Biomasse und Geothermie) und dem spezifischem Lastprofil für Gastronomie und Beherbergungsbetriebe (mit hohem, saisonal relativ konstantem Stromverbrauch) war rasch klar, dass Biomasse hier eine wichtige Bedeutung in der Energieversorgung zukommt.

Weiters ist eine Biomasse KWK-Anlage mit rund 100 kW_{thermisch} und 50 kW_{elektrisch} als Ergänzung zur bereits umgesetzten Hackgutkesselanlage (2 x 150 kW_{thermisch}) geplant.

2.3 BEREITSTELLUNG UND NUTZUNG VON ENERGIE-FLEXIBILITÄTEN

Für die Erreichung eines hohen Eigenversorgungsgrades mit vor Ort generierter, erneuerbarer Energie (teilweise fluktuierend) in Verbindung mit schwankenden Lastprofilen, war die Bereitstellung und Aktivierung von Energie-Flexibilitäten unerlässlich.

Um hier in Verbindung mit den Erzeugungsanlagen auf entsprechende Flexibilisierungspotenziale nutzen zu können, wurden nachfolgende Elemente umgesetzt:

- Heizungspufferspeicher (ca. 40 m³)
- Trinkwasserspeicher (ca. 70 m³)
- Brauchwasserzisternen (ca. 40 m³) zur Regenwassernutzung in Form von Brauch- und Gießwasser
- Thermische Aktivierung von Beton- und Fundamentbauteilen (insbesondere in den Gewächshäusern)
- Stationäre Batteriespeicher (ca. 80 kVA)
- Last- und Energiemanagement für Stromverbrauchsanlagen
- Mobile Batteriespeicher aus Elektrofahrzeugen
- Smartes Regelungskonzept für die allgemeine Speicherfähigkeit der Gebäude
- Wärmerückgewinnung aus Gewerkekälteanlagen (Kühlhäuser + Gastrokühlpulte)
- Wärmerückgewinnung aus Abwärme Holzöfen

Die Besonderheit des gegenständlichen Projektvorhabens zeigt sich in mehrerlei Hinsicht und liegt insbesondere in der:

- spezifischen Nutzung als high-level Speiserestaurant mit exklusiven Wohlfühl- und Nächtigungsräumlichkeiten, Facetten eines Erlebnistourismus, der Produktion von hauseigenen Nahrungsmitteln sowie der Beherbergung der Eigentümerfamilie, Gäste und der Angestellten.
- exponierten Lage mit vor Ort verfügbaren Energieträgern wie Biomasse, Solarenergie, Regenwasser bzw. auch verfügbaren Flächen (Dachflächen, Bodenflächen) um diese Technologien auch einzusetzen
- der synergetischen Nutzung bzw. der Integration der vorhandenen Gebäude, der Gebäudetechnik und der bestehenden Energieversorgungsanlagen
- Nutzung verschiedener Abwärmequellen (Gewerkekälte, Holzöfen) mit hoher energetischer Relevanz

- Möglichkeit vom breiten Nutzungsportfolio in Bezug auf Lastverschiebepotenziale zu profitieren
- Motivation der Eigentümerfamilie die Entwicklung verantwortungsbewusst voranzutreiben.

2.4 OPTIMIERUNG DURCH MONITORING UND SIMULATION

Dieses innovative Projekt wird durch ein umfangreiches Monitoring bezüglich Energieverbrauch und Behaglichkeit begleitet. Somit ist einerseits eine Qualitätskontrolle der geplanten Komponenten möglich und andererseits kann eine weitere Optimierung des Betriebes aufgezeigt und umgesetzt werden.

Die Monitoringergebnisse sind online verfügbar und Basis für die Optimierung des Betriebes und der Regelungstechnik. In einer begleitenden Simulationsberechnung werden die Auswirkungen der möglichen Optimierungen sichtbar dargestellt.

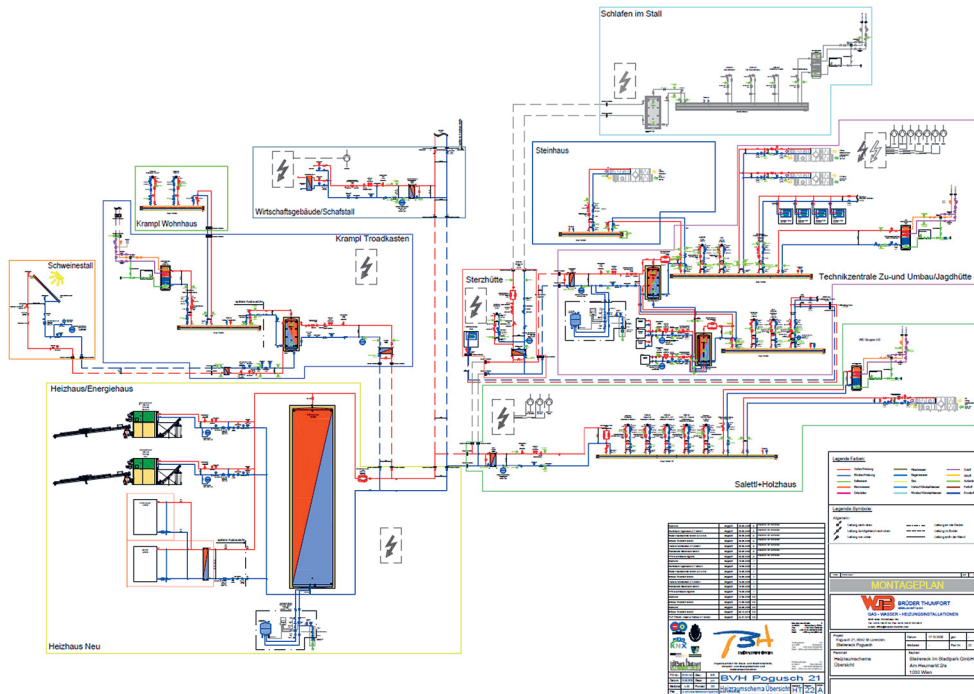


Abb. 5: Darstellung Monitoringkonzept (AEE INTEC u. TBH GmbH)

2.5 INNOVATIONSGEHALT UND EINZIGARTIGKEIT

Auf diese einzigartigen Besonderheiten baut das Innovationspotenzial des Projektes auf, das in übergeordneter Weise die Entwicklung und Umsetzung eines Plus-Energie-Standards in exponierter Lage und unter der Voraussetzung einer stromnetzdienlichen Betriebsweise zum Ziel hatte. Die einzelnen eingesetzten Technologien sind nicht neu, sondern wurden bereits in vorangegangenen Projekten der letzten Jahre erfolgreich eingesetzt. Der besondere Innovationsgrad liegt aber in der intelligenten Verbindung dieser vielversprechenden Technologien zu einem smarten Gesamtenergiesystem, das aus Sicht des Projektteams bisher in keiner vergleichbaren Art und Weise umgesetzt wurde.

Diese Tatsache macht „Energy²POG“ zu einem ökologischen Leuchtturmprojekt.



Abb. 6: Ansicht Glashaus kalt (Steirereck GmbH)

Die wesentlichen Innovationen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bewusste Generierung und Nutzung von Energie-Flexibilitäten (zur Maximierung des Lastverschiebepotenzials, der eigenen Nutzung der vor Ort erzeugten Energie sowie der Minimierung der notwendigen Leistung an Energieversorgungsanlagen)
 - Intelligente Erhöhung der Energieeigenversorgungsgrade (zwischen 70 und 80 Prozent bei Bilanzierung auf Stundenbasis) ohne Energieautarkie als Ziel für die Areal-Entwicklung zu haben
 - Einbindung von E-Mobilität (kleiner hauseigener Fuhrpark, Elektrofahrzeuge von Gästen)
 - Erreichung des Plus-Energie Standards (nicht zu Lasten des übergeordneten Stromnetzes)
 - Maximierte Nutzung der Abwärmequellen, teilweise auch auf experimenteller Ebene (z.B. Feuertische, Holzöfen)
- Formung eines ganzheitlichen, integrierten Energieversorgungskonzeptes bestehend aus einem Portfolio an Bestandsanlagen (Hackgutanlage, 5 kW_p PV) und Neuanlagen (Hackgutanlage (Erweiterung) Wärmerückgewinnung Gewerbekälte + Öfen, 100 kW_{th}/50 kW_{el} Biomasse KWK - in Vorbereitung, 97 kW_p Photovoltaik, Trinkwasser- und Nutzwasserspeicher, Warmwasserbereiter, thermische Bauteilaktivierung, Batteriespeicher, etc.)
 - Energiemanagementsystem
 - Smartes Regelungskonzept, das die allgemeine Speicherfähigkeit der Gebäude, die Leistungsregelmöglichkeiten der Erzeugungsanlagen als auch die vorhin genannten Flexibilisierungsmaßnahmen aktiv berücksichtigt
 - Übertragung der Ergebnisse aus der Konzeptentwicklung auf Detail- und Umsetzungsplanung in einem integralen Planungsprozess
 - System- und Anlagenmonitoring über zumindest ein Kalenderjahr inklusive Betriebsoptimierung und Einbindung der Mitarbeiter.

3. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt geht insofern über derzeitige innovative, österreichische Demonstrationsprojekte im Bereich des nachhaltigen Bauens hinaus, da im Projekt erstmals der Versuch unternommen wird, Energie- und Ressourcenschonung gesamtheitlich für Restaurant- und Beherbergungsbetriebe zu betrachten. Neben einer sehr energieeffizienten Bauweise (hoher Dämmstandard, optimale Zonierung der beheizten Bereiche...) wird auch auf die Nutzung sämtlicher Wärmekapazitäten durch Wärmerückgewinnung (Kühlung, Abwärme von Öfen...) und Energieflexibilität durch z.B. Bauteilaktivierung Wert gelegt. Auch auf nationaler und internationaler Ebene gibt es derzeit wenige ähnliche innovative Vorhaben in diesem Umfang.

Dieses einzigartige Leuchtturmprojekt „Energy²POG“ steht ganz im Fokus des Zusammenspiels zwischen Gastronomie-, Beherbergung sowie nachhaltiger Energie- und Ressourcenschonung und wurde im Rahmen vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft gefördert.

LITERATUR

PPAG (2019) Einreichpläne Projekt Steirereck, PPAG architects ztgmbh, Wien

KONTAKTDATEN:

DI Dr. Karl Höfler

Feldgasse 19

A-8200 Gleisdorf

Email: k.hoefler@aec.at

Session 7b

Surface Heating and Cooling Systems

Designing radiant systems for building retrofit

Junasová, Krajčik, Šimko / Slovak University of Technology / SK
Šikula / Brno University of Technology / CZ

Designing radiant systems for building retrofit

B. Junasová, M. Krajčík, M. Šimko

Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Radlinského 11, 81005 Bratislava, Slovakia

Ondrej Šikula

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 331/95, 60200 Brno, Czechia

ABSTRACT: Buildings are an integral part of our daily lives, whether using the building for housing, work, or industry. Thermal comfort is important to provide a safe, healthy, productive, and comfortable environment. The thermal conditions are affected by the type of heating/cooling system used. This paper was elaborated within a project aimed at adapting the design of radiant systems for building retrofit. The present study focused mainly on the validation of a calculation model that will be subsequently used for detailed heat transfer calculations. Stationary measurements for heating and cooling operation mode and dynamic measurements for heating mode were used for the validation. The validation was performed by comparing the measured and calculated values of surface temperatures at two points at the radiant surface.

1. INTRODUCTION

Potential benefits of radiant systems include the possibility of operation as cooling in summer and heating in winter, easy installation in new as well as existing buildings, minor space requirements, and eliminating the need to reduce the story height when installed in existing buildings. Our research aims to make the construction of radiant heating systems more efficient, especially for use in renovated buildings. The focus is on radiant walls and ceilings because they can be relatively easily constructed on existing structures, e.g., the system with pipes underneath the plaster or a suspended ceiling. The present study aims at the validation of a computer model for the calculation of heat transfer that will be subsequently used for the optimization of the construction of radiant heating and cooling systems.

2. IMPROVING THE DESIGN OF RADIANT SYSTEMS

One of the points of our work is the development of improved heating/cooling systems with an emphasis on their performance and possibilities of use.

The aim is to optimize the design of a radiant system suitable for year-round use, which can be used in existing buildings as part of retrofitting them. Design improvements are therefore mainly focused on the building retrofit, but the radiant systems can also be used in new buildings. In building retrofit, the variability of radiant heating and cooling designs is limited by construction and efficiency constraints, while the number of situations that can arise is high. The factors affecting the optimum design of a radiant ceiling system include the presence of thermal insulation in the ceiling, thermal conductivity and capacity of the bearing structure, thickness of insulation and bearing structure, and temperature on the other side of the structure. The same parameters are crucial for a radiant wall system but on top of that, the possibility to install the radiant system on the other side of the wall in an adjacent room needs to be considered. The combinations of the existing parameters determine the design of the new layers. The design variables include the presence of insulation in the structure, insulation thickness, pipe spacing, water temperature, and the preference for conductive metal fins in the thermo-active layer to homogenize surface temperature distribution.

3. NUMERICAL MODEL FOR HEAT TRANSFER CALCULATIONS

A numerical model was created to address the number of possible situations and designs of the radiant system. The numerical model could be easily modified to cover a wide array of cases and it could generate the results required faster as compared to experimental measurements. The model was validated by experimental data from stationary and dynamic measurements.

The heat transfer was calculated for a representative section of the thermo-active structure. Fig 1 shows the representative section and boundary conditions used for model validation. It corresponded to the design studied by Krajčík et al. (2021) and served as a basis for all the other designs investigated.

The governing equation described the problem as two-dimensional transient heat conduction as follows:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

The numerical model was created and solved using software CalA (Šikula 2011; Krajčík & Šikula 2020; Plasek & Šikula 2014), developed to calculate two-dimensional heat transfer in building structures. The software has been verified according to the procedure in ISO 11855, Part 2 (Annex D).

The model in Fig. 1 considered heat transfer by convection and heat radiation using the Robin-Newton boundary condition. Convection and radiation phenomena were included in the total heat transfer coefficient on surfaces. During the validation of the numerical model, the total heat transfer coefficient on the inner surface was adjusted based on the results of experimental measurements. In subsequent heat transfer calculations by Krajčík et al. (2021), the total heat transfer coefficient on the inner side surface was 8 W/(m²·K) for radiant wall heating and 7 W/(m²·K) for radiant cooling. This is in line with the value used in the model validation and as recommended in ISO 11855.

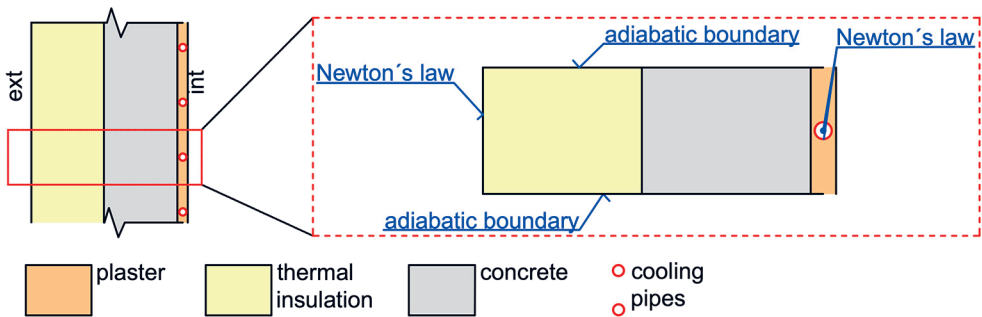


Fig. 1: Boundary conditions defining specific heat flux on a wall surface.

The total heat transfer coefficient on the outer surface in the adjoining room was always 15 W/(m²·K). The heat transfer coefficient on the outer surface may vary depending on the orientation of the surface. The effect of the difference in the coefficient between the wall and the floor on the heat flux distribution is relatively small and has therefore been neglected. The heat transfer coefficient between the pipe and water was 1274 W/(m²·K). The sensitivity study confirmed that in this range the changing coefficient has a negligible effect on the heat transfer rate.

4. VALIDATION OF THE NUMERICAL MODEL

Experimental data obtained from measurements of the heat output of a thermally active radiant heating and cooling surface were used to validate the numerical model. Details concerning the setting and results of experimental measurements are given in Tab. 1 and Fig. 2 and boundary conditions are given in Tab. 2. Two of the experimental cases were selected for validation of the numerical model, one for heating (H2) and one for cooling (C1). In the study of Krajčík et al. (2021), the radiant surface was referred to as the radiant wall, but the tested design was also used as a radiant ceiling.

The measurements were performed using two climatic chambers and a hotbox with controlled temperature, speed, and humidity. The thermally active surface was inserted into a partition dividing the two climatic chambers: one chamber simulated the indoor environment, while the other simulated the outdoor climatic conditions. The required air temperature on the inside of the tested system was achieved by connecting the hot box to the partition containing the wall system.

Tab. 1: Properties of the material layers

Material	Thickness d m	Thermal conductivity λ W/(m.K)	Volumetric weight ρ kg/m ³	Specific heat capacity c J/(kg.K)
(1) Inner plaster	0,025	0,49	1300	840
(3) Aerated concrete	0,2	0,15	475	1000
(4) Thermal insulation	0,1	0,035	17	1270
(2) Pipes	diameter 10,1 mm	0,35	1200	1000

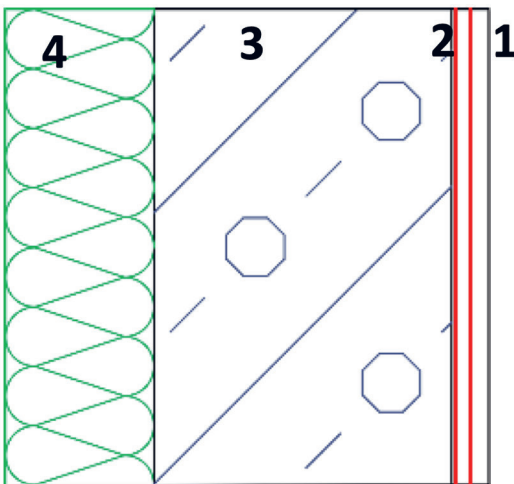


Fig. 2: Detail of fragment (Krajčík et al. 2021)

Tab. 2: Boundary conditions

	Temp. ext. $T_e(^{\circ}\text{C})$	Temp. int. $T_i(^{\circ}\text{C})$	Water Temp. $T_w(^{\circ}\text{C})$	Heat transfer coefficient ext. λ $h_e \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	Heat transfer coefficient int. λ $h_i \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Heating - H2	4	20	29	15	8
Cooling C1	40	26	18	15	7

The dimensions of the experimental system were 1.2 m x 1.2 m and the thickness of the thermal core represented by aerated concrete was 0.2 m (Fig. 2 - No. 3). The experimental system consisted of a thermally active pipe, plaster, a core composed of aerated concrete bricks and external thermal insulation. The pipe was attached to the bricks using commercially available plastic clips at several locations. The space between the pipe and the bricks was filled with plaster. The measured surface temperatures from the climatic chamber (schematically shown in section in Fig. 3 in points A-D in Fig. 4) are given for the heating and cooling mode in Tab. 3.

Tab. 3: Measured surface temperatures at points A and B

	H2	C1
Temperature at surface	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
A1	26,9	20,2
A4	4,28	39,84
B1	24,7	21,7
B4	4,33	39,89

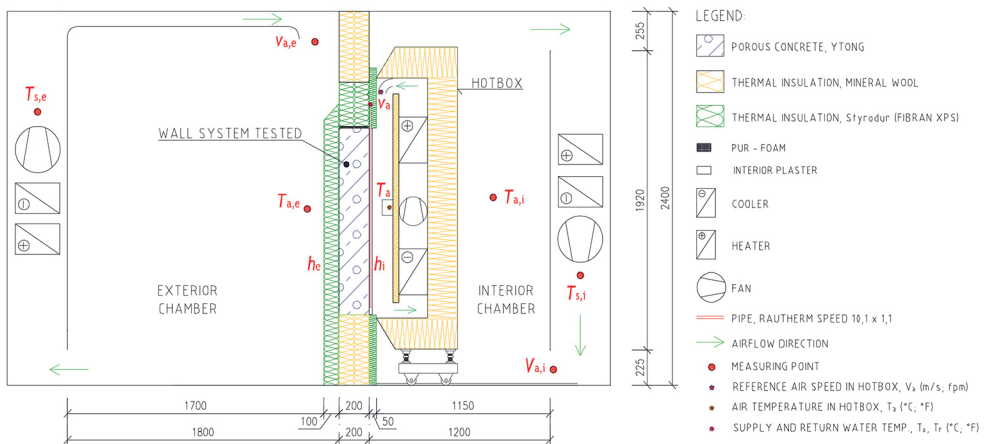


Fig. 3: Cross-section of the climate chambers and hotbox (Krajčík et al. 2021)

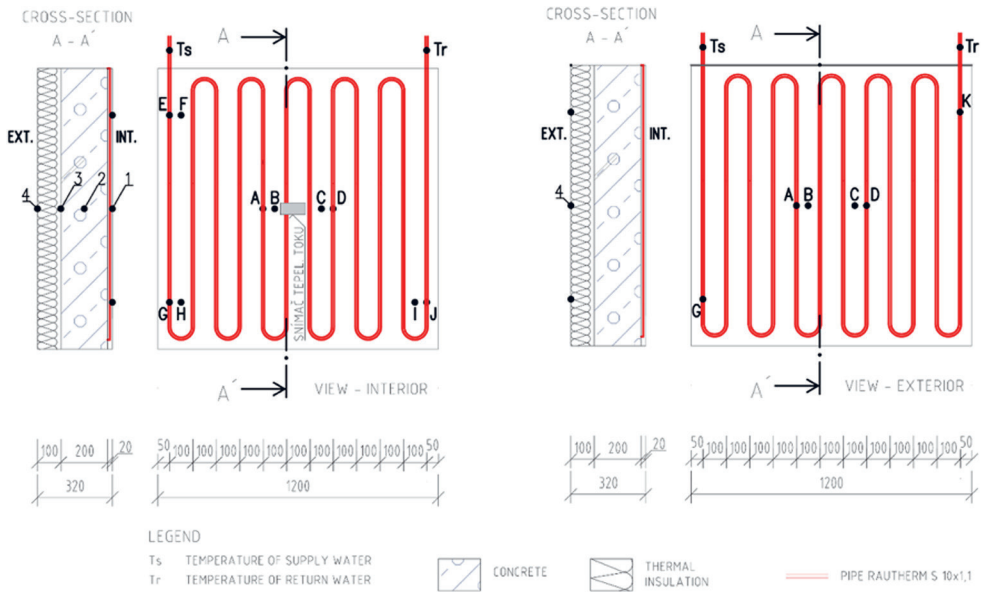


Fig. 4: Experimental wall and position of sensors (Krajčík et al. 2021)

Two cases were selected to validate the numerical model, one of which was the heating mode labelled H2 and the other cooling mode labelled C1. The numerical model was validated using data from stationary measurements in the case of both heating and cooling. In addition, dynamic experimental data available only for the heating mode were used for validation. A representative section of the thermally active surface used for validation is shown in Fig. 5. The thermophysical properties of the material layers used in the model validation are given in Tab. 4 and the boundary conditions such as indoor temperature, outdoor temperature, water temperature and heat transfer coefficient on the surface of the structure are the same as in the experiment.



Fig. 5: Model of the radiant fragment in CalA software

Validation was performed by comparing the surface temperatures at points A and B (Fig. 4). The model was validated by comparing the measured and simulated surface temperature values. The average deviation between the measured and simulated surface temperature was 0.15 % (Tab. 4). The maximum deviation of 0.17 % was obtained for case H2 at point A1 but was lower for most points and cases. The temperature curves in the fragment are shown in Fig. 6 on a detailed temperature field.

Tab. 4: Comparison of surface temperatures for case H2

Validation of the wall section in CalA			
H2	simulation	experiment	difference
Temperature at surface	°C	°C	%
A1	26,28	26,9	0,167
A4	4,34	4,28	-0,003
B1	24,11	24,7	0,146
B4	4,35	4,33	-0,001



Fig. 6: Temperature distribution in the wall section in case H2.

The average deviation between the measured and simulated surface temperature in the cooling case was 0.07 % (Tab. 5). The maximum deviation of 0.06% was obtained for case C1 at point A4 but was lower for most points and cases. The temperature curves in the section are shown in Fig. 7 in a detailed temperature field.

Tab. 5: Comparison of surface temperatures for case C1

Validation of the wall section in CalA			
C1	simulation	experiment	difference
Temperature at surface	°C	°C	%
A1	20,2	20,2	0,000
A4	39,69	39,84	0,060
B1	22,06	21,7	-0,078
B4	39,69	39,89	0,080

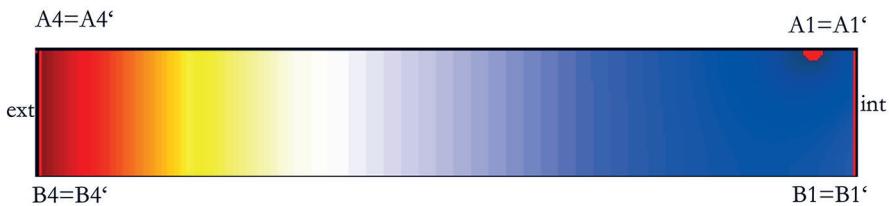


Fig. 7: Temperature distribution in the wall section in case C1.

Subsequently, the step change was applied by dynamic simulations of the radiant fragment for the heating case H2, where the temperature of the water in the pipe changed and all other boundary conditions remained the same. The thermal response was determined from the recorded thermal response curves. Response curves were obtained by a step change in water temperature, which resulted in a step change in surface temperature. The delay between the step change of water and surface temperature was small and neglected. The resulting temperature profile for the step change of 2 minutes, 4 minutes and 8 minutes from the simulations compared to the temperature measured in the experiment on the hotbox radiant element model at point A on the surface of the fragment is shown in Fig. 8 and the temperature profile at point B is shown in Fig. 9. The displayed deviation (maximum 0.17 %) may be caused by the inaccuracy of the measurement by temperature sensors, or a deviation in the mathematical-physical model based on which the simulations were performed. Based on these results, a simulation step of 2 minutes was used for all subsequent calculations, as it represented a compromise between accuracy and computation time.

Thermal response of system in the point A

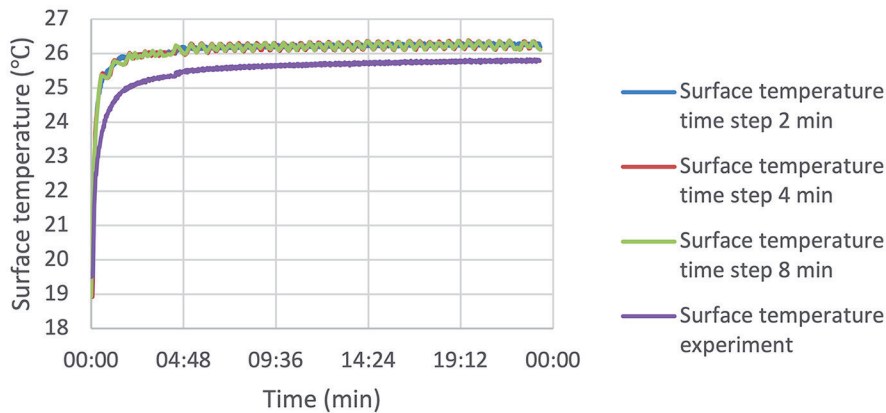


Fig. 8: Thermal response of the system in point A

Thermal response of system in the point B

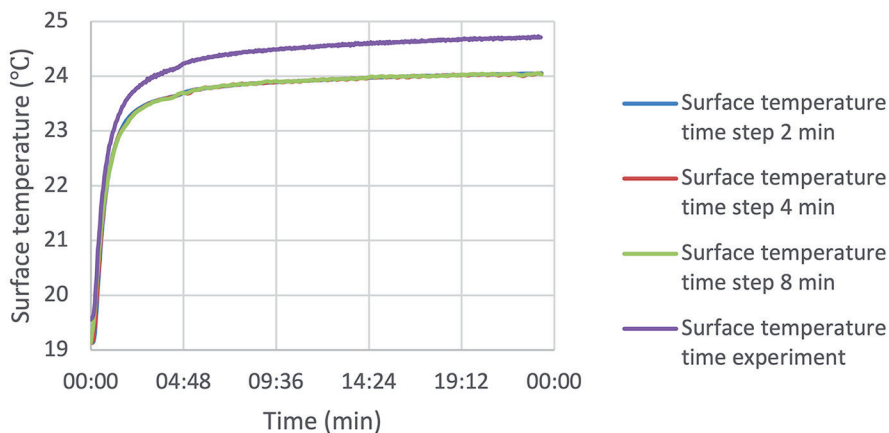


Fig. 9: Thermal response of the system in point B

5. CONCLUSION

The research on the improvement of the construction design of radiant heating and cooling systems has the following main objectives:

1. Development of an improved design of radiant heating and cooling for the renovation of buildings.
The possibility of using radiant systems with a focus on system performance.
2. Verification of thermal comfort in a room with a radiant system by experimental measurements.

In this study, validation was presented, performed by comparing the surface temperatures at points A and B according to the measured values obtained from experiments on the radiant element in the chamber while maintaining all the thermophysical properties of the materials used and their thicknesses. The same boundary conditions were also used as the interior and exterior temperature, the heating/cooling water temperature, as well as the heat transfer coefficient on both sides of the section and the pipe surface. From stationary simulations, the minimum surface temperature deviation was found for both H2 and C1. From the dynamic simulations, the model was verified after time discrediting, where even after increasing the time step from 2 minutes to 4 to 8 minutes, at points A and B on the interior surface of the radiant system, the temperatures coincide. Validation of experimental measurements by simulations confirmed the operating states of the radiant system, which were measured in a climatic chamber. The simulations showed a slight deviation (maximum 0.17 %), which may be due to the inaccuracy of measurement by temperature sensors, also the mathematical-physical model based on which the simulations were performed did not have to enter exact material characteristics and physical quantities corresponding to the state as in the experiment. For example, according to (Krajčík et al. 2021), the problem in connection with the airflow in the hotbox of the climate chamber (see Fig. 3) was solved, which has a significant effect on the heat transfer coefficient on the interior side. This fact may have had an impact on the different results of the simulations compared to the measurements. Despite this inaccuracy, the values calculated during validation corresponded to the course of individual measurements.

REFERENCES

- ISO 11855-2:2012 (2015) Building environment design – Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems – Part 2: Determination of the design heating and cooling capacity, STN EN ISO 11855-2:2012.
- Krajčík M. & Šikula O. (2020) The possibilities, and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings, *Appl. Therm. Eng.* 164 (2020).
- Krajčík M., Šimko M., Šikula O., Szabó D. & Petráš D. (2021) Energy & Buildings, Thermal performance of a radiant wall heating and cooling system with pipes attached to thermally insulating bricks, *Energy and Buildings*, vol. 246
- Plasek J. & Šikula O., Transient numerical simulation of linear thermal transmittance in software CalA, *Adv. Mater. Res.* 1041 (2014) 277–280.
- Šikula O., 2011, Software CalA User Manual (In Czech), Tribun, Brno, p. 42.

CONTACT:

Barbora Junasova
Radlinského 11
810 05 Bratislava
Email: barbora.junasova@stuba.sk

Session 2c

Klimaaktiv

Entsorgung und Kreislauffähigkeit von Gebäuden in klimaaktiv

Leindecker / FH OÖ StudienbetriebsGmbH / AT

Bohrer / FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH / AT

Green Deal - Bauprodukte am Weg in die Circular Economy am Beispiel der Gebäudezertifizierung klimaaktiv

Bauer, Figl, Scharnhorst / IBO / AT

klimaaktiv Kriterienkatalog für Siedlungen und Quartiere für ein nachhaltiges, kommunales Leben

Mit dem klimaaktiv Standard für Siedlungen und Quartiere des Klimaschutzministeriums wird die Qualität einer Siedlung oder eines Quartiers messbar und transparent. Er verknüpft die Qualität der baulichen Infrastruktur, also der Mobilitätsinfrastruktur, Energie- & Wasserversorgung, der Gebäude und öffentlichen sowie halböffentlichen Räume. Darüber hinaus berücksichtigt der Standard die Qualität der Planung, wie beispielsweise die Organisationsstrukturen, Zielsetzungen und Beteiligungsformate.

Der Kriterienkatalog fasst all diese relevanten Themen zusammen und zeigt auf, an welchen Stell-schrauben gedreht werden kann, um Siedlungen und Quartiere lebenswert und klimaverträglich zu gestalten. Er ist öffentlich zugänglich und kostenlos verfügbar. Konkret gliedern sich die zugrunde-liegenden klimaaktiv Kriterien in sechs Handlungsfelder: Management, Kommunikation, Städtebau, Gebäude, Versorgung und Mobilität.

ERSTE ERFOLGSBEISPIELE BESTÄTIGEN ZUKUNFTSWEISENDEN ANSATZ


Schon jetzt gibt es erste ausgezeichnete Projekte und damit erfolgreiche Beispiele für den gesamt-heitlichen klimaaktiv Ansatz im Bereich der Siedlungs- und Quartiersentwicklung: So bietet etwa der Sonnengarten Limberg in Zell am See (Salzburg) mit 194 geförderten Miet- und Eigentumswohnungen, einem Kindergarten, einem Nahversorger und mehreren Büroräumlichkeiten Lebensraum für über 450 Menschen.



Bildcredit: Hillebrand

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Mehr Informationen zum klimaaktiv Standard für Siedlungen und Quartiere sowie der zugehörige Kriterienkatalog stehen hier zur Verfügung: www.klimaaktiv.at/gemeinden/Siedlungen

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

klimaaktiv


Entsorgung und Kreislauffähigkeit von Gebäuden in klimaaktiv

H.C. Leindecker

FH OÖ Studienbetriebs GmbH, Fakultät für Technik & Angewandte Naturwissenschaften, Wels

K. Bohrer

FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH, Wels

ABSTRACT: Every year the construction and demolition waste in Austria contains 11.4 T. of 66.4 T. waste in total. Theoretically there is a high potential of utilisation, which mostly stays unused. The goal should be to optimize the potential of dismantling, utilisation, removal and recycling of components, constructions, and buildings. The approaches of the building rating systems klimaaktiv and TQB in Austria as well as DGNB in Germany were evaluated. Klimaaktiv and TQB both rate the so-called disposal indicator as one of their criteria. In addition, klimaaktiv has a criterion which translates to “dismantling conception”. DGNB covers the topics disposal and circulation capability in its criterion, that translates to “TEC 1.6 dismantling and recycling friendliness”. Their approach appears to be quite detailed. On the other hand, a declaration with DGNB is a bit more expensive, but also more suitable for an international application. The advantage of klimaaktiv is its accessibility for everyone, who is interested in declaring their building. To reach the mentioned goal, the declaration of many buildings is necessary, so it’s beneficial that the different declaration programs have different target groups.

1. EINLEITUNG

Pro Jahr fallen in Österreich rund 66,4 Mio. Tonnen Abfall an. Bau- und Abbruchabfälle machen allein 11,4 Mio. Tonnen aus, wobei Aushubmaterialien nicht mit einberechnet werden (UBA 2021). Dieser Abfall beinhaltet theoretisch ein hohes Potential zur Verwertung, was jedoch weitgehend ungenutzt bleibt. Ziel ist es daher die Rückbau, Verwertungs-, Entsorgungs- und Recyclingeigenschaften von Bauteilen, Konstruktionen und Gebäuden zu optimieren. Gebäudedeklarationen bieten hierfür einen Ansatz, welcher im Folgenden für beispielhafte Deklarationsprogramme untersucht wird. Betrachtet werden die für die genannte Zielsetzung relevanten Kriterien von klimaaktiv, sowie die der Programme TQB und DGNB.

2. THEMA ENTSORGUNG UND KREISLAUFFÄHIGKEIT IN KLIMAAKTIV

Der klimaaktiv-Kriterienkatalog ist in die vier Kategorien A Standort (150 Punkte), B Energie und Versorgung (550 Punkte), C Baustoffe und Konstruktion (150 Punkte) und D Komfort und Gesundheit (150 Punkte) gegliedert. Insgesamt können 1.000 Punkte erreicht werden, wobei für die Basisstufe Bronze mindestens die sogenannten „Muss-Kriterien“ erfüllt werden müssen. Für die Qualitätsstufe Silber müssen zusätzlich mindestens 750 Punkte und für Gold mindestens 900 Punkte erreicht werden. Im Gegensatz zu anderen Gebäudezertifizierungen, ist die klimaaktiv-Deklaration eines Gebäudes kostenlos.

Das Themengebiet Entsorgung und Kreislauffähigkeit wird im klimaaktiv-Kriterienkatalog im Kapitel C Baustoffe und Konstruktion behandelt. Die relevanten Kriterien sind C.4.2 Entsorgungsindeikator und C.4.3 Kreislauffähigkeit und Rückbaukonzept (ÖGUT 2020). Diese Kriterien werden im Folgenden genauer erläutert.

2.1 C.4.2 ENTSORGUNGSINDIKATOR

Das Kriterium C.4.2 Entsorgungsindikator wurde im Jahr 2017 in den klimaaktiv-Kriterienkatalog aufgenommen. Der Entsorgungsindikator (EI) wurde 2003 vom Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO) entwickelt, mit dem Ziel die Menge an Abfällen aus dem Bauwesen zu reduzieren. Die aktuelle Version des Indikators ist der EI10, der 2018 neu und ergänzt veröffentlicht wurde und auch als Kriterium für klimaaktiv dient (IBO 2018).

Für die Ermittlung des Entsorgungsindikators werden die Volumina der betrachteten Bauteilschichten und -konstruktionen mit den jeweiligen Entsorgungs- und Recyclingeigenschaften gewichtet. Berücksichtigt wird der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes.

Wenn der Entsorgungsindikator als Kriterium für klimaaktiv genutzt werden soll, ist die Berechnung gemeinsam mit dem Ökoindex (OI3) entweder für die Bilanzgrenze 1 (BG1) oder die Bilanzgrenze 3 (BG3) möglich. Die beiden Optionen umfassen jeweils die folgenden Bauteilschichten (IBO 2016):

- BG1: Konstruktionen der thermischen Gebäudehülle (TGH vollständig), inkl. Dacheindeckungen, Feuchtigkeitsabdichtungen, hinterlüftete Fassaden, Zwischendecken
- BG3: alle Bauteile aus BG1, zusätzlich: Innenwände (gesamt), Keller, unbeheizte Pufferräume (Baukörper komplett), innenliegende Stiegenhäuser, Verkehrsflächen

Die Entsorgungswege, die für die Beurteilung der Bauteile / Bauteilschichten herangezogen werden, sind Recycling, Verbrennung und Ablagerung.

Beurteilt wird jeweils der aktuelle Entsorgungsweg, der momentan überwiegend (min. 80 %) beschritten wird, sowie das Verwertungspotential, was bis zum angenommenen Zeitpunkt der Entsorgung wirtschaftlich und technisch möglich wäre.

Für die Bepunktung der Entsorgungswege wurde eine Bewertungsmatrix von 1 bis 5 erstellt, wobei 1 jeweils das beste Ergebnis darstellt.

	1	2	3	4	5
RECYCLING	Wiederverwendung bzw. -verwertung zu technisch gleichwertigem Sekundärprodukt oder -rohstoff	Recyclingmaterial wird mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen und kann hochwertig verwertet werden.	Recyclingmaterial ist verunreinigt, kann mit höherem Aufwand rückgebaut und nach Aufbereitung verwertet werden	Downcycling	Kein Recycling möglich
VERBRENNUNG	Hoher Heizwert (> 2000 MJ / m ³); natürliche Metall- und Halogengehalte im ppm-Bereich, sortenreines Material	Wie 1, jedoch nicht sortenrein Anteil an nicht-organischen Fremdstoffen beträgt < 3 Massen-%	Wie 1 oder 2, jedoch mittlerer Heizwert (500 - 2000 MJ/m ³) oder geringfügige Metall- oder Halogengehalte (< 3 Massen-%)	Hoher Stickstoffgehalt, hoher Anteil mineralischer Bestandteile oder erhöhter Metall- oder Halogengehalt (3-10 Massen-%)	Hoher Metall- oder Halogengehalt
DEPONIERUNG	Zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie geeignete Abfälle	Zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigungen	Materialien mit geringem Anteil nicht-mineralischer Bestandteile, z.B. mineralische Baurestmassen mit organischen Verunreinigungen durch Bitumen oder WDVS-Resten	Gipshaltige, faserförmige oder mineralisierte organische Materialien sowie Materialien mit erhöhtem Anteil nicht-mineralischer Verunreinigungen.	Organisch-mineralischer Verbund, Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

Abb. 1: Bewertungsmatrix Entsorgungsindikator (IBO 2020, S.5)

Um den Entsorgungsindikator für eine komplette Konstruktion berechnen zu können, müssen die folgenden Einzelschritte durchgeführt werden (IBO 2020):

- Berechnung des anfallenden Baustoff-Volumens pro Bauteilschicht / Konstruktion
- Berücksichtigung der Nutzungsdauer
- Gewichtung des im gesamten Lebenszyklus anfallenden Volumens mit der Entsorgungseinstufung des Baustoffs
- Gewichtung des im gesamten Lebenszyklus anfallenden Volumens mit dem Verwertungspotential des Baustoffs
- Berücksichtigung der Abfallfraktionen
- Berechnung der Entsorgungsindikatoren der Konstruktion/en EI KON
- Formeln in Sätze verpacken, statt einfügen

Der EI KON setzt sich aus dem EI KON-End of life und dem EI KON-Erneuerung zusammen. Der EI KON-End of life bewertet die Volumina, die zum Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes zur Entsorgung anfallen. Der EI KON-Erneuerung bewertet diese Volumina aus den Austausch- bzw. Sanierungszyklen.

Die klimaaktiv-Bewertung erfolgt unabhängig von der gewählten Bilanzierungsgrenze (ÖGUT 2020):

Mindestanforderung:	$EI10 \leq 45,0$
Bestbewertung:	$EI10 \leq 20,0$
Punktevergabe:	0 – 40 Punkte (Zwischenwerte durch lineare Interpolation)
Nachweis:	Berechnung & Dokumentation des EI10 mithilfe der Energieausweis-Softwareprogramme Archiphysik, AX3000, Ecotech und des Onlinetools eco2soft

Mithilfe des Tools eco2soft wurde der Entsorgungsindikator für ein Beispielgebäude mit den Außenwandaufbauten Holz-Leichtbau, Holz-Massiv und Ziegel-Massiv ermittelt. Die Aufbauten des Flachdachs, der Geschoßdecken, des erdberührenden Bodens und der Kellerwand blieben jeweils gleich. Die Bruttogrundfläche (BGF) des Beispielhauses beträgt 300 m², das Brutto-Volumen (V_B) 976,9 m³ und der Heizwärmebedarf ($HWB_{Ref,SK}$) erfüllt die klimaaktiv-Mindestanforderungen.

Am besten schnitt beim Entsorgungsindikator die Holz-Leichtbauweise ab, mit 16,56 Punkten, gefolgt vom Holz-Massiv-Bau mit 18,94 Punkten. Die höchste und damit schlechteste Punktzahl erhielt der Ziegel-Massivbau mit 23,98 Punkten. Die beiden Holz-Aufbauten liegen unterhalb der Grenze für die Bestbewertung und würden damit bei klimaaktiv 40 Punkte erzielen. Der Ziegel-Massivbau würde mit 36 Punkten bewertet werden.

Die Ergebnisse werden im folgenden Diagramm dargestellt. Außerdem sind dort die Werte des EI KONs der unterschiedlichen Außenwand-Aufbauten dargestellt.

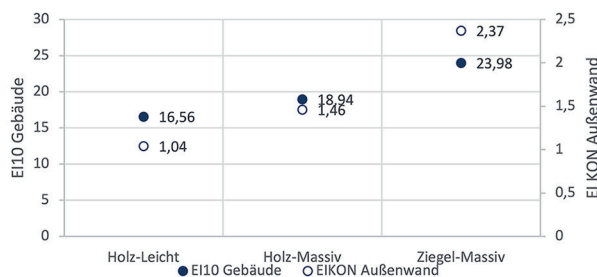


Abb. 2: Werte EI10 Gebäude und EI KON

2.2 C.4.3 KREISLAUFFÄHIGKEIT UND RÜCKBAUKONZEPT

Das Kriterium C.4.3 Kreislauffähigkeit und Rückbaukonzept wurde im Kriterienkatalog 2020 neu eingeführt. Für ein Gebäude werden beträchtliche Materialressourcen benötigt, welche hinsichtlich der folgenden Leitprinzipien für stoffliche und abfallwirtschaftliche Aspekte betrachtet werden sollen (BMK 2021):

Vermeiden – Reduce (z.B. optimierte Raumgrößen), Wiederverwenden – Reuse (möglichst gleichwertig), Produktorientierte Verwertung – Recycling (Aufbereitung zur Wiederverwendung in Produkten / Technologien), sonstige Verwertung (energetisch-thermisch, Verfüllung), Entsorgung / Deponierung (sofern die übrigen Prinzipien nicht angewendet werden können).

Eine wesentliche Basis für das zu erstellende Rückbaukonzept, bildet der Entsorgungsindikator EI10, da dieser die quantitativen Aspekte darstellt. Bei der Betrachtung werden die folgenden Bauteilkategorien berücksichtigt (BMK 2021):

Böden, Oberflächen, ggf. abgehängte Decken, Innenwände, Innentüren, Fassadensysteme, Wärmedämmung, Fenster & Außentüren, Dach, Primärkonstruktion, tragende Decken & Wände, technische Gebäudeausstattung

Die Beschreibungen für die genannten Elemente beinhalten (BMK 2021):

erwartbare Lebensdauer, erwartbarer Aufwand (Zeit, Kosten) auf Basis aktuell etablierter Verwertungsmöglichkeiten oder spezifisch für die verwendeten Produkte/Materialien verfügbarer Verwertungsstrategien, Benennung stofflich-materieller Aspekte (z.B. Volumina, Massen, Flächen), erwartbare Mengen an Wertstoffen, Abschätzung zu entsorgenden Abfällen

Folgende Anforderungen werden genannt (BMK 2021):

Rückbaukonzept bei Neubauten;	Rückbaukonzept bei Bestandsobjekten / Sanierungsvorhaben:
Bereits in Entwurfsplanung: Erstellung erstes Rückbau- & Verwertungskonzept, auf oben genannte Elemente eingehen	Ergänzend: Schad- und Störstofferkundung, vorab Erhebung & Dokumentation Reuse-Potential
Benennung wichtigster Standardbauteile & Potentiale der 5 Leitprinzipien bei kalkulatorischer Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren	Inhalt: Jene Bauteile & Technologien, die im Zuge der Sanierung verändert / im Bestandsobjekt neu eingebaut werden
Bewertung quantitativer Aspekte abfall-wirtschaftlicher Beurteilung über Entsorgungsindikator	Vor Abbrucharbeiten, mit folgenden Recycling- / Verwertungs- / Entsorgungsmaßnahmen, Prüfung gleichwertiger Wiederverwendung & Umsetzung, wenn wirtschaftlich sinnvoll
	Benennung erwartbarer Mengen für Verwertungs- & Entsorgungsstrategien
	Dokumentation analog Entwurfs- & Ausführungsplanung mit ergänzender Berichterstattung

klimaaktiv-Bewertung (ÖGUT 2020):

Punktevergabe:	15 – 20 Punkte Rückbaukonzept: 15 Punkte Dokumentation mit BIM (Building Information Model): 5 Punkte
Nachweis:	Vorlage Rückbaukonzept mit Darstellung der Kreislauffähigkeit des Gebäudes unter Berücksichtigung wichtigster Standardbauteile & Technologien, Sanierungsobjekte: zusätzliche Schad- und Störstofferkundung

Generell müssen Rückbaukonzepte vor Abrissen erstellt werden, bei denen ein Gewicht von 750 Tonnen oder ein Bruttorauminhalt von 350 m³ überschritten wird. Außerdem wird dann eine Schad- und Störstofferkundung durchgeführt. Einfamilienhäuser werden von dieser Regelung nicht erfasst und der Erstellungszeitraum vor dem Abriss, lässt wenig Spielraum für die Rückbaufähigkeit des Gebäudes.

Sinnvoll wäre es daher, wenn ein Rückbaukonzept bereits während der Planung des Gebäudes erstellt wird und zudem auch für kleinere Bauwerke. Für jedes Gebäude gibt es unterschiedliche, sinnvolle Möglichkeiten, um die Rückbaufähigkeit zu verbessern. Einige Beispiele wären der Verzicht auf Klebeverbindungen, die Nutzung vorgefertigter Elemente oder eine klare Trennung zwischen Tragwerk und Ausbauelementen. Die Dokumentation mit BIM ist daher sinnvoll, da in einem BIM-Modell beliebig viele Daten zu den verwendeten Materialien hinterlegt werden können und damit beispielsweise eine Filterung nach Schadstoffen möglich ist. Die Möglichkeiten eines BIM-Modells sind von den Erstellern und der Menge an eingetragenen Daten abhängig. Allerdings bildet ein BIM-Modell bereits eine hilfreiche Grundlage für die Umsetzung des Rückbaukonzepts (Florit 2021).

Aufgrund dessen, dass die Katalogversion, mit der das Kriterium eingeführt wurde, noch sehr neu ist, gibt es bisher nur wenige nach der neuen Version deklarierte Projekte und damit praktisch keine Projekte, die für dieses Kriterium als Beispiel herangezogen werden könnten. Außerhalb des klimaaktiv-Programms gibt es ein Beispiel für ein Gebäude, wofür bereits in der Planungsphase ein Rückbaukonzept entwickelt wurde - das Gugler Kommunikationshaus. Hier wurde die Kreislauffähigkeit des Gebäudes in zwei Subprojekten zu den Themen Bauen mit Recyclingmaterialien und recyclingfähiges Konstruieren sichergestellt. Die Endberichte zu den Projekten sind auf der IBO Homepage einsehbar (IBO 2014).

Gebühren:

keine, da als Selbstdeklaration konzipiert; Erstberatung kostenlos

3. BEWERTUNG IN ANDEREN ZERTIFIZIERUNGSPROGRAMMEN

Als Vergleich werden die beiden Zertifizierungsprogramme TQB und DGNB herangezogen und der jeweilige Ansatz hinsichtlich der Themen Entsorgung und Kreislauffähigkeit untersucht.

3.1 TQB

TQB steht für „Total Quality Gebäudebewertung“. Mit der Entwicklung, die auf die Initiative „Green Building Challenge“ zurückzuführen ist, wurde im Jahr 1998 begonnen (ÖGNB 2018). Die aktuellen Bewertungskriterien sind im ÖGNB-Tool online einsehbar. Diese wurden im Jahr 2021 aktualisiert, um sie an das österreichische Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 anzupassen und um klimaaktiv als Partner-Organisation nachzuziehen (ÖGNB 2021). Es gibt fünf Bewertungskategorien, in denen jeweils 200 Punkte erreicht werden können, wobei das für diesen Beitrag relevanten Kriterium in der Kategorie E „Ressourceneffizienz“ zu finden ist.

Wie bei klimaaktiv wird auch bei TQB der Entsorgungsindikator eines Gebäudes bewertet. Im Unterschied zum klimaaktiv-Kriterium, muss allerdings nicht zwingend der EI10 berechnet werden, es kann auch eine ältere Version des Indikators (EI) herangezogen werden. Gegenüber dem EI wurden beim EI10 die folgenden Aspekte angepasst: Erhöhung des Wertebereichs um den Faktor 10; Anpassung der Entsorgungs- und Verwertungseinstufungen, sowie der Lebensdauern für einzelne Bauprodukte; Anpassung der Bezugsgröße auf Gebäudeebene; Entfallen der Fraktionszahlabminderung; Möglichkeit der Miterfassung von Türen und Fenstern (IBO 2018).

Die Bepunktung erfolgt folgendermaßen (ÖGNB 2021b):

	Entsorgungsindikator EI:	Entsorgungsindikator EI10:
Mindestanforderung:	≤ 3	≤ 40
Bestbewertung:	≤ 1	≤ 15
Punktevergabe:	0 – 60 Punkte	

Von den beispielhaften Wandaufbauten aus Kapitel 2.1 würde die Holz-Leichtbauweise mit 57 Punkten, der Holz-Massiv-Bau mit 51 Punkten und der Ziegel-Massivbau mit 39 Punkten bewertet werden.

Gebühren:

Die Kosten für die TQB-Deklaration eines Gebäudes sind abhängig von der relevanten Bruttogeschossfläche. Die Kosten Planungs- und Errichtungszertifizierung betragen zwischen 120 € (150 m²) und 12.200 € (≥ 25.000 m²) (ÖGNB 2018).

In der aktuellen Version des TQB-Kriterienkataloges wird nur das klimaaktiv-Kriterium C.4.2 aufgegriffen. Geplant ist es allerdings, die im klimaaktiv-Kriterienkatalog 2020 neu aufgenommenen Kriterien, auch in das TQB-Bewertungssystem aufzunehmen (Office ÖGNB 2021).

3.2 DGNB

Das Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) bewertet die Qualität eines Gebäudes über den kompletten Lebenszyklus von 50 Jahren. Abhängig vom Typ des Gebäudes werden bis zu 40 Nachhaltigkeitskriterien bewertet und je nach Erfüllungsgrad Zertifikate in Platin, Gold, Silber oder Bronze vergeben (DGNB 2021). Für jedes Kriterium wird der Beitrag zu den übergeordneten Nachhaltigkeitskriterien, sowie der Beitrag zur Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie bewertet. Die Bewertung des Gebäudetyps Neubau beinhaltet 37 Kriterien, die die 6 Themenfelder Ökologische Qualität (22,5 %), Ökonomische Qualität (22,5 %), Soziokulturelle und funktionale Qualität (22,5 %), Technische Qualität (15 %), Prozessqualität (12,5 %) und Standortqualität (5 %) umfassen. Die Prozentwerte in Klammern bilden den Anteil der Themenfelder an der Gesamtbewertung ab (DGNB 2018).

Für das Themengebiet Entsorgung und Kreislauffähigkeit relevant ist das Kriterium „TEC 1.6 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit“. Bei diesem Kriterium werden die 4 Aspekte Stoffliche Ebene, Konstruktive Ebene, Planerische Verantwortung und Produktverantwortung berücksichtigt.

Um den Umfang des notwendigen Nachweises zu verringern, wird die Bewertung nur für die sogenannten „Regelbauteile“ (RBT) durchgeführt. Als Regelbauteile werden Bauteile mit im Wesentlichen gleichem Aufbau / gleicher Konstruktion bezeichnet.

Das Kriterium wird in drei Indikatoren aufgeteilt (DGNB 2018b):

Indikator 1: Recyclingfreundliche Baustoffauswahl

Die recyclingfreundliche Baustoffauswahl kann über die aktuellen Verwertungswege der Baustoffe, die „Qualitätsstufen“ (QS) zugeordnet sind, erfolgen. Zwei zusätzliche Circular Economy Boni werden für wiederverwendete und wiederverwendbare, sowie vermiedene Bauteile vergeben.

Indikator 2: Rückbaufreundliche Baukonstruktion

Die rückbaufreundliche Baukonstruktion wird über die Demontagemöglichkeit der Bauteile und die Möglichkeit, diese in weitestgehend sortenreine Baustoffe aufzuteilen, bewertet. Auch bei Indikator 2 werden die Bauteile in Qualitätsstufen eingeteilt.

Hinsichtlich dieser beiden Indikatoren sollte ein Großteil der Regelbauteile beurteilt werden.

Indikator 3: Rückbaubarkeit, Umbaubarkeit und Recyclingfreundlichkeit in der Planung

Mithilfe des dritten Indikators wird ein Anreiz zur Anwendung von recycling- und rückbauorientierten Bewertungsmethoden bereits in der Planungsphase des Gebäudes gesetzt. Für die Erfüllung des Indikators muss der Einsatz von Bewertungsmethoden der Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit des Gebäudes nachgewiesen werden.

Punktevergabe:

Für das Kriterium können 100 Punkte erreicht werden, plus zusätzliche 30 Bonus-Punkte. Je nach Art der Gebäudenutzung bedeuten diese Punkte 3,0 – 3,5 % Anteil an der Gesamtbewertung (DGNB 2021b).

Eine konkrete Bewertung eines Beispielgebäudes mithilfe dieses Kriteriums durchzuführen, wurde vorerst zurückgestellt, da vertiefende Infos nur in gebührenpflichtigen Materialien erhältlich sind. Eine beispielhafte eigene Bewertung mit diesem Kriterium und ein Vergleich mit klimaaktiv und TQB ist geplant.

Gebühren:

Die Kosten für eine DGNB-Zertifizierung setzen sich zusammen aus den Zertifizierungsgebühren und den Honorarkosten für den Auditor, die wie bei TQB separat abzustimmen sind. Die Gebühren für die Zertifizierung eines Neubaus oder einer Sanierung von einem Büro- und Verwaltungsgebäude mit einer Größe bis zu 2.500 m² betragen beispielsweise 3.900 € für DGNB-Mitglieder und 6.660 € für DGNB Nicht-Mitglieder (DGNB 2021b).

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die Erläuterungen zu den unterschiedlichen Kriterien und Programmen zeigen die deutlichen Unterschiede auf. Als ein wesentlicher Vorteil des klimaaktiv- und auf Grund der Kompatibilität auch des TQB-Programms, ist die Verfügbarkeit zu nennen. Beide Kriterienkataloge sind über ein Online-Tool übersichtlich einsehbar. Ein zusätzlicher Vorteil von klimaaktiv ist es, dass eine Gebäudedeklaration kostenlos möglich ist. Das betrachtete Kriterium von DGNB macht einen sehr detaillierten Eindruck. Die Deklaration mit DGNB ist im Vergleich zu klimaaktiv relativ kostenintensiv, allerdings auch eher für die internationale Anwendung bzw. für Konzerne geeignet. In der Einleitung wurde als Ziel genannt, das Verwertungspotential von Bau- und Abbruchabfällen zu nutzen. Dass Gebäudedeklarationen zu diesem Ziel beitragen können, müssen diese auf möglichst viele verschiedene Gebäude angewendet werden. Hierbei sind die unterschiedlichen Zielgruppen der betrachteten Programme sinnvoll.

LITERATUR

- BMK (2021) Deklarationstool, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Zugriff am 31.07.2021, https://klimaaktiv.baudoock.at/demo.htm?version_id=415
- DGNB (2018) Grundstruktur des DGNB Systems, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Zugriff am 03.09.2021, https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/Kriterienuebersicht_DGNB_System_Version2018.pdf
- DGNB (2018b) TEC 1.6 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Zugriff am 02.09.2021, https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/05_TEC1.6_Rueckbau--und-Recyclingfreundlichkeit.pdf
- DGNB (2021) Nachhaltiges Bauen: Die Rolle der DGNB, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Zugriff am 31.07.2021, <https://www.dgnb.de/de/themen/nachhaltiges-bauen/>
- DGNB (2021b) Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Homepage DGNB System, Zugriff am 16.08.2021, <https://www.dgnb-system.de/de/>
- Florit C. (2021) Persönliche Kommunikation 07.09.2021, IBO-Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH
- IBO (2014) gugler! build & print triple zero, IBO Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Zugriff am 10.09.2021, <https://www.ibo.at/forschung/referenzprojekte/data/gugler-build-print-triple-zero>

- IBO (2016) Oekoindex 3, Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Zugriff am 31.07.2021, https://www.baubook.at/m/Daten/Bilder/Infos/k2_OI3_broschure_anwendung_2017a.pdf
- IBO (2018) EI Entsorgungsindikator, Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. Zugriff am 31.07.2021, <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/ei-entsorgungsindikator>
- IBO (2020) Berechnungsleitfaden Entsorgungsindikator EI10, Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Zugriff am 31.07.2021, https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/EI10_Berechnungsleitfaden_V2.01_2020.pdf
- ÖGUT GmbH – Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (2020) klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten und Sanierung 2020, Zugriff am 17.05.2021, <https://www.klimaaktiv.at/service/publikationen/bauen-sanieren/kriterienkatalog-wohnbau-2020.html>
- ÖGNB (2018) Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: *ÖGNB* Homepage, Zugriff am 31.07.2021, <https://www.oegnb.net/>
- ÖGNB (2021) „Und Tschüss 2020, Willkommen 2021!“ - Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Zugriff am 02.08.2021, https://www.oegnb.net/upload/file/2021_%C3%96GNB.pdf
- ÖGNB (2021b) *ÖGNB-Tool*, Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Zugriff am 31.07.2021, <https://www.oegnb.net/zertifikat.htm?typ=wb&sop=7583,7585,7584,7594,7615,7614,7613,7616>
- Office ÖGNB (2021) AW: Fragen zu TQB-Kriterien, office@oegnb.net, 03.09.2021
- Umweltbundesamt (2021) Abfallaufkommen in Österreich, Zugriff am 10.05.2021, <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/abfall/abfallaufkommen>

KONTAKTDATEN:

FH-Prof. DI Dr. Herbert Claus Leindecker
4600 Wels, Stelzhamerstraße 23
Email: herbert.leindecker@fh-wels.at

Green Deal - Bauprodukte am Weg in die Circular Economy am Beispiel der Gebäudezertifizierung klimaaktiv

B. Bauer, H. Figl, A. Scharnhorst

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: The EU's Green Deal with the goal of a climate-neutral economy by 2050 requires optimisations in the building industry. To this end, assessments of building materials based on life cycle assessments and environmental labels should enable an evaluation of CO₂ emissions and recyclability.

In the future, building materials should make an optimal contribution to the circular economy and climate protection in terms of sustainability and not emit any pollutants into the environment or indoor air.

In the klimaaktiv assessment, points are awarded for the life cycle assessment of the entire building, for the preparation of a deconstruction concept or for the review of disposal properties and for product optimisation with regard to low emission.

Assessment methods that take the recyclability into account are still little harmonised at the European level. The comprehensive assessment of building materials is possible and desirable, as can be seen in the example of the klimaaktiv building assessment. Tools such as eco-labels (Austrian Eco-label, natureplus) and product databases (baubook, ökobaudat) are available free of charge and online.

1. EINLEITUNG

Wie kann die im Green Deal geforderte Kreislauffähigkeit im Rahmen einer Gebäudezertifizierung bewertet werden?

Kreislauffähigkeit im Bauwesen umfasst viele Ansätze wie etwa das rückbaufreundliche Konstruieren, die Dokumentation der verbauten Materialien, vorzugsweise über digitale Erfassung, die Schadstofffreiheit von Bauprodukten, die Bauteilwiederverwendung ebenso wie die Gewinnung und Verwendung mineralischer Körnungen.

Kennzahlen und Kriterien der Umweltauswirkungen von Bauteilen

Umweltzeichen, EPDs und Produktbeschreibungen der Hersteller informieren auf unterschiedlichste Weisen über die ökologischen Eigenschaften von Bauprodukten. Im klimaaktiv-Kriterienkatalog 2020 wurden für die bessere Beurteilung neue Parameter eingeführt, die den Beitrag der Baumaterialien zu Energieverbrauch im Lebenszyklus ebenso wie deren Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt und damit auch der Kreislauffähigkeit darstellen. Auch die Rückbaubarkeit findet erstmals explizit Erwähnung in einem eigenen Kriterium.

Rechtliche Rahmenbedingungen auf EU-Ebene ebenso wie die nationalen Anforderungen erfordern eine noch sorgfältigere Produktauswahl für Gebäude aller Art.

2. WELCHE ROLLE SPIELEN BAUPRODUKTE IM GREEN DEAL?

2.1 INTERNATIONALE UND NATIONALE VORGABEN

193 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen haben 17 Sustainable Development Goals für eine nachhaltige Entwicklung unterzeichnet. Auf EU-Ebene wurde unter der Überschrift „Green Deal“ mittlerweile im Klimaschutzgesetz eine Reduktion der CO₂-Emissionen bindend festgeschrieben, der Circular Economy Action Plan verlangt eine Wiederverwendung und -verwertung von Rohstoffen und die EU-Klima-Taxonomie-Verordnung definiert Vorgaben für nachhaltige Investitionen. Die nationale

Nachhaltigkeitsstrategie in Österreich umfasst zum Beispiel Vorgaben für die öffentliche Beschaffung, in der konkrete Kriterien für Bauprodukte verankert sind ebenso wie in Gebäudezertifizierungen wie etwa klimaaktiv.

Lange war die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden im Fokus des Klimaschutzes. Mit zunehmender Energieeffizienz werden aber auch die im Gebäude verbauten Bauprodukte immer relevanter. Laut Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission (COM(2020) 98)

- ist die gebaute Umwelt für etwa 50 % der gesamten Rohstoffgewinnung in der EU verantwortlich;
- verursacht das Baugewerbe über 35 % des gesamten Abfallaufkommens;
- werden die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Bauprodukten auf 5 bis 12 % der gesamten nationalen Treibhausgasemissionen geschätzt;
- könnten mit einer höheren Materialeffizienz 80 % dieser Emissionen eingespart werden.

Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Kreislaufwirtschaft gehen häufig Hand in Hand. Es kann aber auch zu gegenläufigen Effekten kommen. Dämmmaßnahmen, die wichtig für die Steigerung der Energieeffizienz sind, können den Rückbau von Gebäuden erschweren. Die verbauten Dämmstoffe können Schadstoffe enthalten, wie z.B. das erst seit einigen Jahren verbotene Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD), welches entweder vor dem Recycling aus dem Dämmstoff herausgetrennt werden muss oder ein Recyclingverbot zur Folge hat. Umgekehrt können Materialien, wie z.B. Metalle, sehr gut recycelbar sein und dennoch hohe Treibhausgasemissionen bei der Herstellung verursachen. Es ist wichtig, immer beide Schutzziele im Auge zu behalten.

Unter kreislauffähigen Baustoffen werden im vorliegenden Beitrag daher Produkte verstanden, welche

- einen optimalen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft
- **und** zum Klimaschutz liefern
- **und** keine Schadstoffe in die Umwelt oder die Raumluft abgeben.

2.2 BEWERTUNGEN ÜBER DEN LEBENSZYKLUS

Die unterschiedlichen ökologischen Aspekte von kreislauffähigen Baustoffen – Klimaschutz, Schadstofffreiheit, Kreislauffähigkeit werden von verschiedenen ökologischen Methoden unterschiedlich erfasst und bewertet. Die meisten Methoden sind nicht oder (noch) nicht ausreichend harmonisiert.

Als Bewertungen sind derzeit Ökobilanzierungen und Umweltkennzeichnungen üblich. Eine wichtige österreichische Quelle für ökologische Produktinformationen ist die online Plattform www.baubook.at.

2.2.1 Ökobilanzierung

Die Ökobilanz ist eine Methode zur quantitativen Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen „potenziellen Umweltwirkungen“ (ISO 14040). Da Ökobilanzen grundsätzlich auf die Bewertung des gesamten Lebenszyklus abzielen, werden sie auch als Lebenszyklusanalyse (englisch: Life Cycle Assessment, kurz LCA) bezeichnet.

Die Ergebnisse der Ökobilanz werden meist über Umweltproduktdeklarationen (EPDs) veröffentlicht. Die EPDs enthalten die wichtigsten methodischen Annahmen und Tabellen mit den Ökobilanz-Indikatoren. Sonstige Angaben zum Produkt, wie z.B. technische Eigenschaften oder umweltrelevante Informationen sind meist auf das Wesentliche beschränkt und nicht standardisiert.

2.2.2 Umweltkennzeichnungen nach Typ I, II oder III nach ISO 14021

Mit der Kennzeichnung durch Umweltzeichen und -deklarationen werden diese Eigenschaften sichtbar gemacht. Das hilft bei der Entscheidung in der Planung und beim Einkauf und bringt Punkte bei der Gebäudezertifizierung.

Unterschieden wird im Wesentlichen in **Umweltzeichen** (Typ I) wie etwa dem Österreichischen Umweltzeichen oder natureplus, in **Umweltdeklarationen** (Typ III) wie der EPD (Environmental Product Declaration) und in **Anbietererklärungen** (Typ II).

Während Umweltzeichen umweltrelevante Eigenschaften eines konkreten Produktes bewerten, dienen Umweltdeklarationen der Darstellung der Eigenschaften zumeist in Form von Ökobilanzdaten für einzelne Produkte, aber auch für ganze Branchen. Umweltbezogene Anbietererklärungen beziehen sich zumeist auf eine einzelne Eigenschaft wie etwa „konservierungsmittelfrei“ und werden vom Hersteller ohne Drittverifizierung herausgegeben.

2.2.3 Kreislauffähigkeit von Baustoffen

Die Ökobilanzmethode wird auch quantitative Bewertungsmethode genannt, weil das Ergebnis Indikatorwerte sind, die über naturwissenschaftliche Modelle berechnet werden. Die Ökobilanzmethode weist essenzielle Schwachstellen bei der Abbildung der Kreislauffähigkeit von Baustoffen auf. Für die Bewertung der Kreislauffähigkeit werden daher häufig qualitative Methoden eingesetzt.

In Figl et al. (2020) wurden Bewertungsansätze für die Kreislauffähigkeit aus verschiedensten Ländern zusammengestellt und analysiert. Ergebnis der Analyse war, dass alle Bewertungssysteme im Grunde vergleichbare Ansätze z.B. bezüglich der bewerteten Parameter haben, sich die Bewertung im Detail jedoch grundlegend unterscheidet. Von einer europäischen Harmonisierung ist man in diesem Feld aktuell also noch weit entfernt. In Österreich können die Entsorgungseigenschaften mithilfe des EI10 sichtbar gemacht werden.

3. KRITERIEN AM BEISPIEL DER GEBÄUDEBEWERTUNG KLIMAAKTIV

In der klimaaktiv-Gebäudebewertung mit 4 Kapiteln finden sich Kriterien zu Ökobilanzierungen und Kreislaufwirtschaft im Kapitel „C Baustoffe und Konstruktion“ sowie zu Produktoptimierungen vor allem hinsichtlich Emissionsarmut in Kapitel „D Komfort und Gesundheit“.

3.1 BAUSTOFFE UND KONSTRUKTIONEN

Berücksichtigt werden die Vermeidung und Verringerung von Schadstoffen konkret für die stark treibhauswirksame Substanz HFKW, für PVC und SVHC (Substances of very high concern), aber auch die Verwendung von umweltfreundlich(er)en Produkten. Weiters werden Ökobilanzen des Gesamtgebäudes berücksichtigt.

Folgend die gekürzte Beschreibung der einzelnen Anforderungen wie im Deklarationstool www.baudock.at veröffentlicht.

3.1.1 Oekoindex

Die ökologische Wertigkeit der Konstruktionen bzw. des Gesamtbauwerks im Lebenszyklus werden mit Hilfe des „Oekoindex“ (OI3-Indikator) beurteilt. Der Entsorgungsindikator kann gemeinsam mit dem Oekoindex OI3 berechnet werden.

3.1.2 Entsorgungsindikator

Der EI 10 wurde für die einheitliche Beurteilung der Entsorgungseigenschaften von Bau- und Werkstoffen auf Gebäudeebene erstellt.

3.1.3 Kreislaufwirtschaft

Im klimaaktiv-Gebäudestandard werden die Leitprinzipien der Circular Economy wie folgt beschrieben:

1. **Vermeiden – Reduce:** Maßnahmen zur Verringerung von Abfallmengen. Beispielhafte Maßnahmen: schlanke Konstruktionen, optimierte Raumgrößen, Vorortverwendung von Aushub, Sand und dergleichen

2. **Wiederverwenden – Reuse:** möglichst gleichwertige Weiterverwendung von Materialien, Bauteilen oder eingesetzten Technologien

3. **Produktorientierte Verwertung – Recycling:** Aufbereitung von Materialien zur Wiederverwendung in Produkten oder Technologien in vergleichbaren oder geringwertigeren Produkten

4. **Sonstige Verwertung:** energetisch-thermische Verwertung, Verfüllung

5. **Entsorgung / Deponierung,** sofern die oben genannten Prinzipien nicht anwendbar sind.

Diese, aus der Abfallwirtschaft stammende, Betrachtungsweise in die Praxis der Bauwirtschaft umzusetzen, soll durch die Erstellung von Rückbaukonzepten besser gelingen.

3.1.3.1 Rückbaukonzept bei Neubauten

Bei Neubauten ist bereits in der Entwurfsplanung durch die Ersterstellung eines Rückbau- und Verwertungskonzept auf die oben genannten Aspekte einzugehen. Dabei sind für die wesentlichsten Standardbauteile und bei einer kalkulatorischen Gesamtnutzungsdauer des Gebäudes von 100 Jahren die Potenziale der fünf genannten Leitprinzipien zu benennen.

3.1.3.2 Rückbaukonzept bei Bestandsobjekten und Sanierungsvorhaben

Ergänzend zu den oben genannten Aspekten wird eine umfassende Schad- und Störstofferkundung durchgeführt, bei der verpflichtend vorab das Reuse-Potenzial zu erheben und dokumentieren ist. Die Dokumentation des erstellten Rückbaukonzepts einschließlich Reuse-Potenzialen und Schad- und Störstofferkundung erfolgt in Analogie zur Entwurfs- und Ausführungsplanung mit ergänzender Berichterstattung.

3.1.3.3 BIM-Modell für umfangreiche Bauvorhaben

Die BIM-Methode kann über einen effizienten Datenaustausch bei der Produktwahl in der Planungs- und Ausführungsphase unterstützen – je früher im Planungsprozess ökologische Bewertungen und Optimierungen angesetzt werden, desto größer ist das Verbesserungspotenzial.

Für den verwertungsorientierten Rückbau am Lebensende des Gebäudes („Urban Mining“) ist eine Dokumentation der verbauten Materialien essenziell. Die Dokumentation unterstützt außerdem bei der Instandhaltung und Instandsetzung von Gebäudeteilen.

3.2 PRODUKTMANAGEMENT

Das Produktmanagement berücksichtigt mehrere Ziele des Green Deals. Ursprünglich war das Ziel des Produktmanagements, auch Chemikalienmanagement genannt, vor allem eine gute Raumluftqualität sicherzustellen. In einer Kreislaufwirtschaft sind Produkte, die keine oder nur ein Minimum an Schadstoffen enthalten, darüber hinaus besser wiederzuverwenden oder -verwerten bzw. zu entsorgen.

3.2.1 Ablauf des Produktmanagements in der ökologischen Beschaffung

Ein strukturierter Ablauf ist Voraussetzung für ein lebenszyklus- und lieferkettenbegleitendes Produktinformationsmanagement. Die systematische Beschaffung von ökologischen Baustoffen vom Entwurf bis zur Ausführung wurden erstmals ab 2005 im Demonstrationsvorhaben (Gemeindezentrum Ludesch) erprobt und seither systematisch zu einer standardisierten Dienstleistung entwickelt. Die AuftraggeberInnen werden bei der Verankerung der Kriterien in der Ausschreibung und Vergabe unterstützt. Dies beinhaltet Baueinleitungsgespräche mit den Ausführenden sowie Bauproduktfreigaben bzw. -optimierungen für die einzelnen Gewerke. Während der Realisierung des Bauprojektes werden stichprobenartige Kontrollen auf der Baustelle durchgeführt. Abschließend werden Innenraumluftmessungen zur Bestätigung der Innenraumluftqualität durchgeführt.

3.2.2 Produktmanagement in 3 Stufen

In klimaaktiv werden die zu erfüllenden Anforderungen ab dem Kriterienkatalog 2020 in 3 Stufen gegliedert. Die Anforderungen sind für Dienstleistungsgebäude und für Wohngebäude die gleichen. Für die Stufe 1 wird der Innenausbau nach ÖNORM B 1801-1:2015-12 herangezogen, geprüft werden sollen Produkte, die in Aufenthaltsräumen wie etwa Büros, Wohn- und Schlafräume eingesetzt werden. Für die Stufe 2 und 3 werden darüber hinaus horizontale und vertikale Baukonstruktionen wie Fassade und Dach in Betracht gezogen. Tiefgaragen und Außenanlagen müssen nicht berücksichtigt werden.

Dabei werden in Stufe 1 emissionsarme Produkte für den Innenausbau berücksichtigt. Das bedeutet, es werden die Bauproduktgruppen mit der größten Relevanz für die Raumluftqualität, nämlich Verlegwerkstoffe, Bodenbeläge, Holzwerkstoffe, Beschichtungen, Innenwandfarben und Bitumenmassen überprüft.

In Stufe 2 werden auch emissionsarme Produkte für die Anwendung im Außenraum gefordert, das bedeutet die Produktgruppen der Stufe 1 werden ergänzt mit den Produktgruppen Innenwandputze, Dämmstoffe, Dichtstoffe, Flüssigkunststoffe sowie Kleb- und Füllstoffe.

In der Stufe 3 kommen weitere Kriterien für die Schadstoffarmut hinzu, erfasst werden müssen im Wesentlichen die Produktgruppen der Stufe 2.

Die anzuwendenden Kriterien sind auf der Plattform www.baubook.info veröffentlicht. Sie werden nicht nur für klimaaktiv sondern auch u.a. auch in der öffentlichen Beschaffung angewendet.

Bauproduktmanagement als baubegleitende Maßnahme ermöglicht – meistens kostenneutral – die Verwendung von Bauprodukten, die volkswirtschaftlich gesehen großen Nutzen stiften: Die Gesundheit von ArbeitnehmerInnen auf der Baustelle ebenso wie im fertiggestellten Gebäude wird kurz- und vor allem langfristig geschont.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Baumaterialien sind aufgrund ihrer Menge und Masse in mehrfacher Hinsicht für das Erreichen der Klimaziele essentiell. Bauprodukte und -komponenten sollen einen optimalen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und zum Klimaschutz liefern und keine Schadstoffe in die Umwelt oder die Raumluft abgeben.

Dazu können alle Beteiligten beitragen, zum Beispiel die BauherrInnen mit dem klaren Auftrag, Kreislauffähigkeit in allen Ebenen zu berücksichtigen; die Planenden mit der Entwicklung rückbaubarer Konstruktionen, der Wiederverwendung von Bauteilen und dem Einsatz von Recyclingbaustoffen, die BauproduktHersteller mit abfallarmem Produkt- und Verpackungsdesign, vermehrtem Einsatz von Sekundärrohstoffen aus Baustellenabfällen, aber auch aus dem Rückbau und Abbruch.

Bewertungsmethoden, die die Kreislauffähigkeit berücksichtigen, sind auf europäischer Ebene noch wenig harmonisiert. Die umfassende Beurteilung von Baumaterialien ist wie am Beispiel der klimaaktiv-Gebäudebewertung ersichtlich, möglich und wünschenswert. Werkzeuge wie Umweltzeichen (Österreichisches Umweltzeichen, natureplus) und Produktdatenbanken (baubook, ökobaodat) stehen kostenlos und online zur Verfügung.

Die Nachfrage nach gesundheitsfördernden und allergikergerechten Bauprodukten wird weiter ansteigen. Die strengeren Vorgaben durch den Circular Economy Action Plan werden die Fragen nach Wiederverwendung und -verwertung erneut stellen. Durch die Pandemie wird die Raumluftqualität und damit die Frage nach emissionsarmen Bauprodukten stärker fokussiert. Mit dem Lieferkettengesetz wird auch im Bauwesen die soziale Verantwortung wichtiger als bisher. Die transparente und nachverfolgbare Darstellung und Dokumentation von Produkteigenschaften zur Sicherstellung der gewünschten Qualität ist angesichts der Produktvielfalt in der Bauwirtschaft dringend erforderlich.

An ökologischen Baustoffen wird kein Weg vorbeiführen – wir brauchen sie für Klimaschutz, für eine nachhaltige Entwicklung und unsere persönliche Gesundheit und Wohlbefinden.

LITERATUR

- COM(2020) 98 Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel, den 11.3.2020
- Figl H., Thurner C., Kellner R., Nemeth I., Schneider P. (2020) Sekundärbaustoff-Kreisläufe im BNB als Beitrag zum ressourceneffizienten Bauen. Auftragnehmer: Figl, Thurner (IBO); Kellner (ak Architekten); Nemeth (Hochschule Ansbach); Schneider (TU München); Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn/Berlin. Forschungsprogramm: Zukunft Bau: SWD 10.08.17.7–18.18. Endbericht am 30.04.2020
- ÖNORM B 1801-1:2015-12-01 Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 1: Objektterrichtung.

KONTAKTDATEN:

Barbara Bauer
Alserbachstraße 5/8
1090 Wien
Email: barbara.bauer@ibo.at

Session 3c

Rechtliches und regulatorisches Umfeld

Demand Side Management – Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen

Kuhlmann, Seeber / FH Burgenland GmbH / AT

Transforming product efficiency policy into system efficiency policy

Díaz / ECODESIGN company GmbH / AT

Siderius / Netherlands Enterprise Agency / NL

Brüniger / Swiss Federal Office of Energy / R. Brüniger AG / CH

Die Digitalisierung des Energieaudits

Hofer, Rammerstorfer, Stipsits / e7 energy innovation & engineering / AT

Demand Side Management – Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen

J. Kuhlmann, F.E. Seeber
FH Burgenland, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: A legal consideration of demand side management shows that the existing legal framework offers comprehensive possibilities for this new type of market participant, but that the desired aggregation of loads from end consumers still represents uncertainties. When developing future business models, however, the existing consumer and data protection regulations must be taken into account and extended to these new business models, including the special rules for end consumers on electricity markets.

1. EINLEITUNG

Durch den zunehmenden Anteil volatiler Erzeugung aus erneuerbaren Energien gewinnt die aktive Einbindung von Haushaltskund*innen in den Strommarkt mehr an Bedeutung. Unter dem Schlagwort „Demand Side Management“ (DSM) werden Maßnahmen entwickelt, die einen aktiven Beitrag zur effizienten Erreichung eines nachhaltigen Energiesystems leisten sollen, indem dem steigenden Bedarf an Flexibilität im Stromsystem Rechnung getragen wird. Um Anreize für ein systemdienliches Verhalten von Stromendkund*innen zu liefern, werden neue Applikationen für den Haushaltsbereich entwickelt. Diese Applikationen stellen in der Regel zusätzliche Services (Home-Automation, Home-Convenience und Home-Security) bereit, die durch ihren Zusatznutzen zu einer nachhaltigen Verhaltensänderung bei Verbraucher*innen führen sollen.

Neben den energierechtlichen Rahmenbedingungen, die durch das vierte EU-Energierechtspaket „Saubere Energie für alle Europäer“ (Europäische Kommission, 2016) eine stärkere Einbeziehung von Verbraucher*innen vorsehen, sind insbesondere auch datenschutzrechtliche Fragestellungen bei derartigen Dienstleistungen zu berücksichtigen. Auch wenn sich die Konzepte für DSM im Einzelnen stark unterscheiden, ist es sinnvoll und möglich die rechtlichen Rahmenbedingungen unter Einbeziehung EU-rechtlicher und nationaler Vorgaben allgemein abzustecken. Daraus ergibt sich die Fragestellung: *Welche energie- und datenschutzrechtlichen Vorgaben sind bei der Ausgestaltung, Einführung und Durchführung von Demand Side Management zu berücksichtigen?*

2. ENERGIERECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

2.1 DEMAND SIDE MANAGEMENT RECHTLICH BETRACHTET

Demand Side Management kann definiert werden als das Planen, Umsetzen und Überwachen von Maßnahmen, die geeignet sind Verbraucher*innen zu motivieren ihre Stromverbrauchsmuster, einschließlich des Zeitpunkts und der Höhe ihrer Nachfrage nach elektrischer Energie, zu verändern (SGTF-EG3 2015). In diese Definition fällt insbesondere auch das Instrument der Laststeuerung (*demand response*), das im vierten EU-Energierechtspaket erstmalig als „eine Abweichung der Endkunden-Elektrizitätslast von ihren üblichen oder aktuellen Stromverbrauchsmustern als Reaktion auf Marktsignale, etwa zeitabhängige Strompreise oder Anreizzahlungen, oder als Reaktion auf das angenommene Angebot eines Endkunden, eine Nachfrageverringering oder –erhöhung zu einem bestimmten Preis auf einem organisierten Elektrizitätsmarkt [...] zu verkaufen, allein oder durch [Aggregation]“ (Artikel 2 Z 20 RL (EU) 2019/944) rechtlich definiert wird.

2.2 EU-RECHT

Energierecht ist zu einem beträchtlichen Ausmaß durch EU-Recht determiniert, fällt Energie doch in die Gruppe der von der EU und ihren Mitgliedsstaaten geteilt wahrzunehmende Zuständigkeiten (Art 4 Abs 2 lit i und Art 194 AEUV). In Bezug auf DSM sind insbesondere die Elektrizitätsbinnenmarktverordnung (VO (EU) 2019/943) sowie die Elektrizitätsbinnenmarkttrichtlinie (RL (EU) 2019/944) zu berücksichtigen. Durch diese wird dem ehemals eher passiven Verständnis von (End)Kunden*innen, explizit eine aktive Komponente iSe „*prosumers*“ (Art 2 Nr 8 RL (EU) 2019/944) hinzugefügt. Dadurch erlangen Endkund*innen nunmehr auch explizit die Möglichkeit als (potenzielle) Marktteilnehmer auf allen Elektrizitätsmärkte tätig zu werden. Erklärtes Ziel der RL (EU) 2019/944 ist es diesbezügliche „rechtliche und kommerzielle Hindernisse“ zu beseitigen (ErwG 42), wobei die nationalen Lösungen je nach Elektrizitätsmarktdesign sehr unterschiedlich ausgestaltet sein können. Als Grundlage für neue Geschäftsmodelle wird dabei insbesondere die Möglichkeit der „Laststeuerung durch Aggregation“ (Artikel 17 RL (EU) 2019/944) dienen können. Dadurch wird der Funktion des „Aggregators“ größere Bedeutung zukommen. Dieser wird weder in RL (EU) 2019/944 noch in VO (EU) 2019/943 eigens definiert, eine Definition findet sich jedoch in Art 2 Nr. 45 Energieeffizienzrichtlinie (RL 2012/27/EU) wo der Aggregator als „Lastmanagement-Dienstleister, der verschiedene kurzfristige Verbraucherlasten zwecks Verkauf oder Auktion in organisierten Energiemärkten bündelt“ benannt wird. Tatsächlich geht das Verständnis von Aggregation des letzten Energierechtspakets jedoch weiter, da darunter nicht nur die Bündelung von Verbraucher- bzw. Kundenlasten verstanden wird, sondern auch jene von erzeugter Elektrizität (Art 2 Nr. 18 RL (EU) 2019/944). Diese Tätigkeit kann durch Versorger, durch mit ihnen verbundene Marktteilnehmer selbst wahrgenommen werden oder durch unabhängigen Aggregatoren (Art 2 Nr 19 RL (EU) 2019/944) erfolgen. Der Umfang dieser Begriffsdefinition ist unklar (Ennser, 2017), und auf Grund der fehlenden Rechtsfolgen, die mit dieser Qualifikation verbunden sind, wohl auch eher programmatisch zu deuten (siehe dazu auch ErwG 39 RL (EU) 2019/944).

Unabhängig von der Art des Aggregators hat seine Teilnahme auf den Elektrizitätsmärkten als „Vermittler zwischen den Kundengruppen und dem Markt“ (ErwG 39 RL (EU) 2019/944) – soweit auf Grund der technischen Anforderungen (Art 17 Abs 5 RL (EU) 2019/944) möglich – diskriminierungsfrei zu erfolgen. Dies umfasst zumindest die in Artikel 17 Abs 3 RL (EU) 2019/944 aufgelisteten Elemente. Rechte und Pflichten der Aggregatoren ergeben sich durch die von ihnen wahrzunehmende Marktrolle (Ennser & Gattringer, 2019).

2.3 NATIONALE UMSETZUNGSSPIELRÄUME

Die sich daraus ergebenden nationalen Umsetzungsspielräume sollen dazu führen, dass die Rolle des Aggregators, an die jeweiligen Marktregeln angepasst werden kann. Die Herausforderungen der sich eine nationale Umsetzung gegenüberstellt, ist die Fähigkeit diese neuen Marktteilnehmer in das bestehende Marktdesign möglichst gewinnbringend und effizient zu integrieren, wobei der Nutzen sowohl auf Seiten der Endkund*innen als auch auf Seiten der Bezieher dieser (in den meisten Fällen) gebündelten Elektrizität liegen soll. Dadurch soll einerseits die Teilnahme an DSM-Maßnahmen gefördert und andererseits der Markt für Systemdienstleistungen belebt werden (ErwG 39 RL (EU) 2019/944).

Somit ergeben sich aktuell folgende Herausforderungen für die Umsetzung dieses neuen, *prosumer*-beteiligten Elektrizitätsbinnenmarktes: (1) DSM-Anbieter müssen als zusätzliche Marktteilnehmer, höchstwahrscheinlich insbesondere in Form von Aggregatoren, in das aktuelle Marktmodell integriert werden. In Österreich wurde zwar die Möglichkeit der Aggregation für Bürgerenergiegemeinschaften (§ 7 Abs 1 Z 6a iVm § 16a EIWOG 2010) und Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften (§ 79 EAG) geschaffen, die Implementierung des Aggregators in die nationale Rechtsordnung ist bisher jedoch noch unterblieben und soll wohl in einem zukünftigen Rechtsakt, dem „Strommarktgesetz neu“ (Ennser, 2020) erfolgen. Der Begriff es „Aggregators“ hat jedoch bereits Berücksichtigung bzw. Erwähnung in dem Konzept für die Weiterentwicklung der Netzentgeltstruktur im Strombereich (E-Control, 2020) sowie in den Sonstigen Marktregeln nach § 22 Z 1 E-ControlG gefunden. Konkrete Anordnungen und Rechtsfolgen ergeben sich jedoch weder aus dem einen noch aus dem anderen.

(2) Die Rolle der DSM-Anbieter müssen so ausgestaltet sein, dass es weder zu einer Diskriminierung noch zu einer Besserstellung gegenüber anderen Marktteilnehmern kommt. Dies betrifft den diskriminierungsfreien Zugang zu allen Elektrizitätsmärkten, für die sie sich technisch eignen, insbesondere jenen für Regelreserve. Gleichzeitig haben sie für die von ihnen im Stromnetz verursachten Ungleichgewichte die finanzielle Verantwortung zu übernehmen. Durch Integration in bestehende Elektrizitätsmärkte ist ihnen notwendigerweise auch ein diskriminierungsfreier Zugang zu den erforderlichen Datensätzen zu gewähren.

(3) In Bezug auf unabhängige DSM-Anbieter sind Endkund*innen vor unangemessenen Reaktionen ihrer Versorger zu bewahren (Art 13 RL (EU) 2019/944). Die Integration von DSM-Mechanismen im Zusammenhang mit Endkund*innen setzt aber insbesondere auch eine flächendeckende Ausrollung von intelligenten Messgeräten voraus (ErwG 52 RL (EU) 2019/944), die in Österreich weit hinter dem Zeitplan der IME-VO zurückliegt und in der Verantwortung der Netzbetreiber liegt (§ 1 IME-VO). Endkund*innen, die sich an DSM-Modellen beteiligen wollen, können diesen Prozess jedoch durch einen gemäß § 1 Abs 5 IME-VO an den Netzbetreiber herangetragenen Wunsch, beschleunigen. Die damit verbundenen datenschutzrechtlichen Rahmenbedingungen für DSM-Anbieter sind nicht zu unterschätzen und werden im Folgenden erläutert.

3. DATENSCHUTZRECHTLICHE ASPEKTE UND MASSNAHMEN

Da die Erhebung und Nutzung personenbezogener Daten (z. B. Verbrauchs- und Nutzungsdaten von Haushalten) für Betreiber von DSM-Systemen eine der wichtigsten Voraussetzungen für ihr Geschäft ist, müssen die inhärenten Risiken für die Rechte und Freiheiten der betroffenen (natürlichen) Personen angemessen bewertet und gemindert und Regeln für die Erhebung personenbezogener Daten festgelegt werden, die die Verhältnismäßigkeit der Erhebung im Hinblick auf den Zweck der Verarbeitung und die Rechtsgrundlage gewährleisten. Für die Datenverarbeitung Verantwortliche, sind daher verpflichtet, die Auswirkungen solcher Systeme vor ihrer Einführung zu bewerten, geeignete Datensicherheitsmaßnahmen zu treffen und diese einer regelmäßigen Prüfung zu unterziehen.

3.1 DATENERHEBUNG UND -VERARBEITUNG

Detaillierte Stromverbrauchsdaten können zur Identifizierung spezifischer Merkmale führen, die Informationen über den sozioökonomischen Status, die Wohnung und die Geräte eines Haushalts mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % offenlegen können. Darüber hinaus sind Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes mit Sicherheitsrisiken verbunden, da Kriminelle in der Lage sein könnten, auf die Daten zuzugreifen und die Informationen zu nutzen, um Rückschlüsse darauf zu ziehen, was die Bewohner*innen in ihrem Haus tun oder ob sie sich außerhalb des Hauses aufhalten (Beckel et al., 2014).

Personenbezogene Daten, die in Smart Meter/Smart Grid-Umgebungen erhoben und verarbeitet werden, können insbesondere Registrierungsdaten von Verbraucher*innen (Namen und Adressen der betroffenen Personen, etc.), Nutzungsdaten (Energieverbrauch, Bedarfsinformationen und Zeitstempel), Profile der Verbrauchertypen, Daten zum Betriebsprofil der Einrichtung (z. B. Nutzungsstunden, Anzahl und Art der Nutzer*innen im Zeitverlauf), Häufigkeit der Datenübermittlung sowie Abrechnungsdaten und Zahlungsmethoden von Verbraucher*innen sein. Auch können Verarbeitungen besondere Kategorien personenbezogener Daten (sensible Daten) iSv Art 9 Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) betreffen, wenn sich aus diesen z. B. Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand von Verbraucher*innen ziehen lassen.

3.2 MASSNAHMEN ZUR DATENSICHERHEIT

Gemäß Art 24 Abs 1 DSGVO muss der Verantwortliche unter Berücksichtigung der Art, des Umfangs, der Umstände und der Zwecke der Verarbeitung sowie der unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeit und Schwere der Risiken für die Rechte und Freiheiten natürlicher Personen geeignete technische und organisatorische Maßnahmen treffen, um sicherzustellen und den Nachweis dafür erbringen zu

können, dass die Verarbeitung DSGVO-konform erfolgt. Dabei hat der Verantwortliche insbesondere unter Berücksichtigung des Stands der Technik sowie der Implementierungskosten geeignete technische und organisatorische Maßnahmen zu treffen, um ein dem Risiko angemessenes Schutzniveau zu gewährleisten (Art 32 Abs 1 DSGVO).

Datensicherheitsmaßnahmen können dabei unterschiedlich aussehen. § 54 DS-G normiert technische und organisatorische Maßnahmen die für Verantwortliche vorgesehen sind. Sie beinhalten als Datensicherheitsmaßnahmen verschiedene Arten der Kontrolle, die durchgeführt oder gegeben sein müssen und betreffen maßgeblich Zugangs- und Zugriffs-, Speicher-, Benutzer-, Übertragungs- und Eingabekontrolle.

Soweit Datenverarbeitungen, insbesondere bei Verwendung neuer Technologien, aufgrund der Art, des Umfangs, der Umstände und der Zwecke der Verarbeitung voraussichtlich ein hohes Risiko für die Rechte und Freiheiten natürlicher Personen zur Folge haben, muss der Verantwortliche vorab eine Abschätzung der Folgen der vorgesehenen Verarbeitungsvorgänge für den Schutz personenbezogener Daten durchführen (Art 35 Abs 1 DSGVO). Bei der Entwicklung einer neuen Anwendung oder eines neuen Systems sollte daher im Einklang mit dem in Art 25 Abs 1 und 2 DSGVO festgelegten Grundsätzen von „Datenschutz durch Technikgestaltung“ (*Data Protection by Design*) sowie „datenschutzfreundlichen Voreinstellungen“ (*Data Protection by Default*) eine Datenschutz-Folgenabschätzung von der ersten Idee über die Konzeption bis hin zur Umsetzung durchgeführt werden. Der Ansatz des *Data Protection by Design* gewährleistet hierbei, dass potenzielle Risiken identifiziert werden und geeignete Kontrollen bereits in die entsprechenden Systeme eingebaut werden können.

Immer wenn personenbezogene Daten verarbeitet werden sollen, ist auch zu prüfen, ob dies für betriebliche Zwecke unbedingt erforderlich ist (Grundsatz der Datenminimierung). Ist dies nicht der Fall, sollte die Verarbeitung personenbezogener Daten nach Möglichkeit vermieden werden.

3.3 SCHLÜSSELINSTRUMENT DATENSCHUTZ-FOLGENABSCHÄTZUNG

Die DSGVO sieht die Datenschutz-Folgenabschätzung als ein Kerninstrument zur Stärkung der Rechenschaftspflicht der für die Verarbeitung Verantwortlichen vor, da sie dem für die Verarbeitung Verantwortlichen nicht nur dabei hilft, die Anforderungen der DSGVO zu erfüllen, sondern auch nachzuweisen, dass geeignete Maßnahmen gesetzt wurden, um die Einhaltung der Datenschutz-Grundverordnung zu gewährleisten. (vgl. Bitkom, 2017). Obgleich die Durchführung einer Datenschutz-Folgenabschätzung nur bei Verarbeitungen, die mit einem hohen Risiko für die Rechte und Freiheiten natürlicher Personen verbunden sind, verpflichtend ist, ist die Einhaltung anderer Vorgaben der DSGVO, insbesondere von Datensicherheitsmaßnahmen, unabhängig von der Durchführung der Datenschutz-Folgenabschätzung, jederzeit zu gewährleisten.

Art 35 Abs 3 DSGVO beschreibt drei Arten von Datenverarbeitungsvorgängen, die eine Datenschutz-Folgenabschätzung erfordern, wobei nur Art 35 Abs 3 lit a und b DSGVO für die Verarbeitung von Daten in dem hier untersuchten DSM-Zusammenhang relevant erscheinen. Diese betreffen Fälle, in denen eine systematische und umfassende Bewertung persönlicher Aspekte natürlicher Personen, die sich auf einer automatisierten Verarbeitung gründet und die ihrerseits als Grundlage für Entscheidungen dient, welche eine Rechtswirkung gegenüber natürlichen Personen entfalten oder diese in ähnlich erheblicher Weise beeinträchtigen, stattfindet (Art 35 Abs 3 lit a DSGVO) oder in denen eine umfangreiche Verarbeitung besonderer Kategorien personenbezogener Daten gemäß Art 9 Abs 1 DSGVO erfolgt (Art 35 Abs 3 lit b DSGVO). In Bezug auf den zweiten Fall ist anzumerken, dass die Verarbeitung besonderer Kategorien personenbezogener Daten in der Regel nicht Teil von Stromnetz-relevanten Datenverarbeitungsvorgängen ist, allerdings für bestimmte DSM-Anwendungen bedeutsam sein kann. Daher sollten ihre spezifischen Anforderungen bereits in der Entwicklungsphase einfließen, um sicherzustellen, dass die Anwendungen im Einklang mit den rechtlichen Rahmenbedingungen sind und erforderlichenfalls Maßnahmen vor deren Implementierung gesetzt werden können.

Risiken für die Rechte und Freiheiten natürlicher Personen sind in erster Linie die Folgen von Bedrohungen, die ein unerwünschtes Ereignis auslösen könnten, weshalb ein wesentliches Ziel der

Datenschutz-Folgenabschätzung die Identifizierung und Bewertung von Bedrohungen ist (ErwG 84 DSGVO). Ein wichtiger Input, der bei der Identifizierung von Bedrohungen verwendet wird, ist eine Liste der Risikoquellen, z. B. Insider (Personen, die der Organisation angehören), Outsider (Personen von außerhalb der Organisation) oder unbeabsichtigte Risiken (beschädigter Sensor, Naturkatastrophe wie Blitzschlag, Energieungleichgewicht, Energieunterbrechung, Stromausfall). Die Risikobewertung wird hiernach anhand von zwei Kategorien vorgenommen: der Schwere des möglichen Schadens der in Bezug auf die Rechte und Freiheiten des Einzelnen und der Wahrscheinlichkeit, dass die damit verbundenen Bedrohungen tatsächlich eintreten. Einige Hinweise, die für die Bewertung von DSM-Anwendungen relevant sein könnten, finden sich bereits in den Erwägungsgründen der DSGVO. Die Bewertung oder das Scoring von Verbraucher*innen, einschließlich der Erstellung von Profilen und Vorhersagen, wird als Verarbeitung eingestuft, die „wahrscheinlich ein hohes Risiko mit sich bringt“ (ErwG 71 und 91 DSGVO).

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass auch in Fällen von DSM-Anwendungen, in denen nicht klar ist, ob eine Datenschutz-Folgenabschätzung erforderlich ist, eine Prüfung nach den dort entwickelten Grundsätzen empfehlenswert ist, da sie ein nützliches Instrument für die Verantwortlichen ist, um einerseits die Anforderungen der DSGVO zu erfüllen, andererseits aber auch, um den Grundsatz *Privacy by Design* zu gewährleisten, indem potenzielle Auswirkungen auf die Rechte und Freiheiten der betroffenen Personen antizipiert und Schutzmaßnahmen ergriffen werden können. Gleichzeitig werden nationale Datenschutzbehörden dabei unterstützt, die Konformität der Verarbeitung, und insbesondere die Risiken für den Schutz der personenbezogenen Daten und die entsprechenden Garantien, zu bewerten und das Risikomanagementverfahren, das ein für die Datenverarbeitung Verantwortlicher einführen und durchführen muss, ergänzt.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Eine rechtliche Betrachtung von DSM bedingt regelmäßig eine Analyse der dahinterstehenden Geschäftsmodelle. Als Ergebnis zeigt sich, dass der bereits bestehende Rechtsrahmen umfassende Möglichkeiten für diese neuartige Einbindung bietet, gewisse gesetzliche Spielräume – insbesondere für die Bündelung von Lasten von Endkund*innen – jedoch auf Grund fehlender Integration des „Aggregators“ Unsicherheiten darstellen. Bei der Entwicklung zukünftiger DSM-Geschäftsmodelle sind jedoch jedenfalls die bereits bestehenden verbraucher- und datenschutzrechtlichen Vorgaben zu berücksichtigen, wobei die bisher bestehenden Besonderheiten für Endverbraucher*innen auf Elektrizitätsmarkt nun auch auf Teilnehmer an DSM-Geschäftsmodellen analog ausgeweitet werden müssen.

LITERATUR

- Beckel, C., Sadamori, L., Staake, T. & Santini, S. (2014) Revealing household characteristics from smart meter data. In: *Energy* Vol. 78, pp 397-410. Amsterdam: Elsevier.
- Bundesgesetz, mit dem die Organisation auf dem Gebiet der Elektrizitätswirtschaft neu geregelt wird (Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010 – ElWOG 2010) BGBl. I Nr. 110/2010 idF BGBl. I Nr. 150/2021.
- Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG) BGBl. I Nr. 150/2021.
- Bundesgesetz über die Regulierungsbehörde in der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (Energie-Control-Gesetz – E-ControlG) BGBl. I Nr. 110/2010 idF BGBl. I Nr. 150/2021.
- Bundesgesetz zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten (Datenschutzgesetz – DSGVO), BGBl. I Nr. 165/1999 idF BGBl. I Nr. 14/2019.
- Bitkom (2017) Leitfaden - Risk Assessment & Datenschutz-Folgenabschätzung Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (Bitkom). Berlin, Deutschland.

- E-Control (2020) „Tarife 2.1“ – Weiterentwicklung der Netzentgeltstruktur für den Stromnetzbereich, Positionspapier der Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control). Wien, Juni 2020.
- Ennsner, B. (2017) Energierecht für (inter)aktive Kunden: Gemeinschaftliche Erzeugungsanlagen im EIWOG 2010 und andere Modelle der kollektiven Marktteilnahme. In: Paulus, E. (Hrsg.) Jahrbuch Regulierungsrecht 2017, NWV, 167-183.
- Ennsner, B. (2020) Energiegemeinschaften im geltenden und künftigen Rechtsrahmen. Fachtagung „Energiegemeinschaften – wohin geht die Reise?“ Wien, 14. September 2020.
- Ennsner, B. & Gattringer, L. (2019) Strommarkt re-designed: Neue Akteure, neue Regeln. *ecolex* 2019, 828-831.
- Europäische Kommission (2016) Saubere Energie für alle Europäer. KOM (2016) 860.
- Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG, ABl. L 315/1.
- Richtlinie (EU) 2019/944 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit gemeinsamen Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU, ABl. L 158/125.
- SGTF-EG3 (2015) Smart Grids Task Force – EG3 Report Regulatory Recommendations for the Deployment of Flexibility, Expert Group 3 - Regulatory Recommendations for Smart Grids Deployment (ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/EG3%20Final%20-%20January%202015.pdf).
- Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung), ABl. L 119/1.
- Verordnung (EU) 2019/943 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über den Elektrizitätsbinnenmarkt, ABl. 158/54.
- Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der die Einführung intelligenter Messgeräte festgelegt wird (Intelligente Messgeräte-Einführungsverordnung – IME-VO) BGBl. II Nr. 138/2012 idF BGBl. II Nr. 383/2017.

KONTAKTDATEN:

Josefine Kuhlmann und Friedrich E. Seeber

Campus 1

7000 Eisenstadt

Email: josefine.kuhlmann@fh-burgenland.at; friedrich.seeber@fh-burgenland.at

Transforming product efficiency policy into system efficiency policy

A. Díaz

ECODESIGN company GmbH, Vienna, Austria

H.-P. Siderius

Netherlands Enterprise Agency, Utrecht, Netherlands

R. Brüniger

Swiss Federal Office of Energy/R. Brüniger AG, Bern/Ottenbach, Switzerland

ABSTRACT: Minimum efficiency performance standards (MEPS) and energy labels are amongst the most widely used and effective policy instruments to increase energy efficiency for energy-using products. However, policies with a broader focus on the energy efficiency of *systems* could address energy consumption in an integral way and increase energy savings. Policy makers need to consider diverse strategic issues when pushing for this next frontier in energy efficiency policy because of a range of regulatory issues.

This paper explores a methodological approach that can be used to transform product energy efficiency policy into system efficiency policy. It provides a definition of a system, presents attributes and its classification, and analyzes options for regulating systems. The relevant elements of existing regulatory approaches are discussed with examples of selected systems, to illustrate and discuss the regulatory challenges. The paper provides suggestions for overcoming these challenges. It comments on the importance of suitable verification procedures and robust test methods, and concludes with concrete recommendations for the further development of a systems approach in efficiency policy.

1. INTRODUCTION

System efficiency policies seem to offer in many cases larger energy saving potentials than existing energy efficiency policies for products. This is discussed in a number of studies, with estimated energy saving potentials from setting system efficiency policies up to 50 % (e.g. for lightning systems; van Tichelen et al. 2016). Minimum efficiency performance standards (MEPS) and labelling schemes are in place in the EU and in many countries for regulating the energy efficiency of a variety of residential and commercial (energy using) products. Still, for the case of systems, no policy seems to exist yet. System policies need to be further explored, to advance the development of an effective energy efficiency policy. This paper presents a methodological approach, discusses the main challenges associated with the transformation of product efficiency policy into system efficiency policy, and provides directions to further develop this new approach.

2. DEFINITION AND CLASSIFICATION OF SYSTEMS

A system describes a whole or an entity made of several parts (individual items). The system as a unified whole refers to its functionality, as well as the interaction between the different parts, and the interaction between the system and its environment. A system uses energy and/or other inputs (water and consumables) to deliver a certain performance or functionality, as shown in Fig. 1.

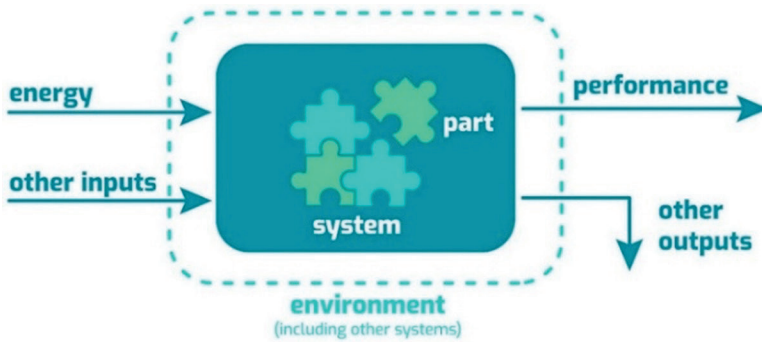


Fig. 1: Systems aspects.

A refrigerator can be considered as a “product” with parts assembled in an “industrial process”. In contrast, a “system” has as an essential and distinctive characteristic that (some of) the parts are assembled *on location* before the system can function. A system is produced not (only) in a factory but at the location where it will be used. This paper therefore proposes the following definition:

A system is a functional unit that consists of multiple parts that need to be assembled at the location where the system is used.

To function on site, energy using systems need to be assembled *and* installed, meaning connecting the system to another system in the environment, e.g., to the grid. This definition introduces further aspects to be explored for regulating systems, especially those related to the “parts” and the “assembly”. These two concepts are used to define attributes, which help describe and classify systems, especially in terms of the complexity regarding a possible regulation. This paper discussed only three of the ten attributes of systems considered (see Tab. 1).

The number of parts (1) to be assembled influences many other attributes, and might be of relevance. For example, parts that are identical (2) will probably reduce regulatory burden for both, regulators and market actors. The impact of the assembly on the energy consumption of the system (3) may also influence the verification and the type of requirements in a regulation. Other attributes not discussed include the percentage of standardized parts, number of regulated parts, number of possible combinations, impact of the parts on energy consumption, impact of the location, number of actors involved, and the likelihood of systems changes over lifetime.

Tab. 1: Selected attributes of a system relevant for its classification.

	Attribute	Range	Remarks
1	Number of parts	small - medium - large	Indicative values e.g.: small < 5 medium 6-10 large > 10
2	Percentage of identical parts (%)	small - medium - large	Indicative values e.g.: small < 25 %, medium 25-75 % large > 75 %
3	Impact of assembly on energy consumption/performance	small - medium - large	Note that this does not refer to the “sizing” of the system.

For introducing a classification tree, the attributes discussed are mostly focusing on the parts (type and numbers) and on the assembly, as shown in Fig. 2.

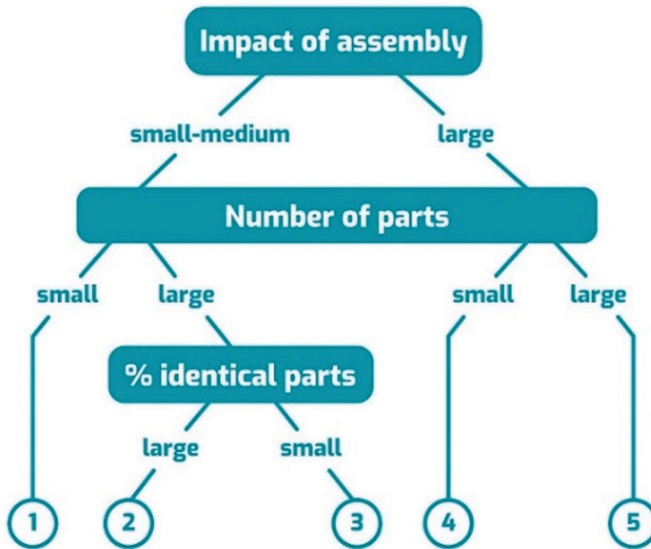


Fig. 2: Classification tree (the complexity of systems increases from left to right).

Selected examples of systems according to this classification tree are:

- 1 A multi split air conditioning system with one outdoor unit and several indoor units.
- 2 A lighting control system (with standardized parts) for an office building.
- 3 A building and automation control system with standardized parts (impact of assembly is small), with a large number of functions (heating, lighting, security, etc.). The number of parts is large, but the percentage of identical parts is (probably) small.
- 4 A walk-in cooler or freezer.
- 5 A compressed air system for a factory, including piping.

3. ELEMENTS AND CHALLENGES OF REGULATING SYSTEMS

This section covers the main elements of energy efficiency policy for systems such as scope, requirements, and verification; and discusses possible challenges.

3.1 SCOPE AND ADDRESSEES

The *scope* deals with the products or systems to be included or addressed in a regulation. Scope is often related to the (main) function(s) and/or characteristics of the system. A “technology neutral” scope focuses on the function, i.e., all systems that fulfil the indicated function(s) are in scope, regardless of the technology used. For applications such as moving air or pumping a liquid, a product and a systems can both provide the same function, so both would need to be in the scope and be subject to the same requirements. Defining the *system boundaries* is important for specifying the scope for the regulation. The setting of the scope is also related to the conditions of use. Setting the scope too narrow for certain

conditions of use, increases the risk of falling out of the scope, and thereby evading the requirements of the regulation.

The system definition presented before considers diverse *addressees*; the manufacturer of the parts, the company that offers the system to a customer (or the customer that specifies the system), and the company that assembles (and installs) the system. The change to a systems approach for policy brings up issues of the responsibility of the actors; because their responsibilities may be different in light of the enforcement process of the regulation.

3.2 EFFICIENCY METRIC AND REQUIREMENTS

Efficiency relates output (performance) to input (energy) – or vice versa. Whereas an *efficiency metric* could in principle always be formulated, the setting of *requirements* (level or limit for the value of the metric) for a system using metrics can be more difficult, because the energy consumption and performance depend on the assembly, the design and the location where the system is used. These conditions need to be reflected both when setting the *requirements*, and included in the test method used for verification. For example, using a refrigerator in a warm room might lead to other requirements and test methods than when it is to be used in a cold room. It might not be possible or easy to establish a single requirement that all systems in scope shall comply with.

Another aspect is the relation between requirements for the parts of the system and the system itself. First, efficient requirements for individual parts may not always result in a highly efficient system; e.g., an efficient electrical motor and an efficient variable speed drive (VSD) can work together in an inefficient way. An optimal, reciprocal alignment of these parts enables an efficient system.

Secondly, setting requirements for the system will have to consider the need for having requirements for the individual parts. If both, the requirements for the parts and the system requirements can be measured, the requirements for the parts could be considered superfluous. However, verification may need to use results from testing of parts of the system to derive result for the system by using a model. To ensure the robust input of data for the model, setting requirements for the parts can be useful. Moreover, parts used in regulated systems may also be used as standalone, or even be used in other non-regulated systems. In practice, it might be difficult to differentiate a part used in a regulated system and parts used elsewhere; then the parts used elsewhere would not be regulated.

3.3 TEST METHODS AND VERIFICATION

The main purpose of a *test method* as part of verification is to measure, in an objective and reproducible way, the characteristics of a system, such as its performance and/or its energy consumption. The tests standards specify the test conditions, define the admissible deviations, and set the accuracy and handling of the test equipment. A test method should also be representative, i.e., the test conditions, including the prescribed operation of the system, should reflect the location where it is to be used. However, testing a system under real conditions might not be possible; and testing the system only under laboratory conditions might be less useful if the impact of the assembly is large. Verification should therefore focus on the (quality of the) assembly.

There are three levels of verification (including any combination of them) which could be used in a systems regulation. The *System level* deals with testing the system as assembled; and using modelling to cover the full extent of the “operational” range of that system. The *Part level* deals with testing all parts of the system; and using a model to derive from these results of parts, the results for the system. Finally, the level of *Assembly*; where the quality of the assembly is checked.

3.4 REGULATORY POWERS

Another important aspect in a systems approach is understanding the regulatory powers of the relevant authorities (i.e., ministries and surveillance authorities) for adopting, executing and enforcing the energy efficiency regulation. This aspect relates to the scope, to the territorial jurisdiction, and also to the legal powers of the (market surveillance) authorities. Systems may not be in the scope of the authority's regulatory powers, e.g., Federal authorities may not have jurisdiction over systems that are assembled in a state or a province. Market surveillance authorities may not have the power to enforce cooperation when testing a system on location. Changing regulatory powers is often a slow and difficult process due to the involvement of higher order legislation.

3.5 METHODOLOGICAL APPROACHES FOR ASSESSING SYSTEMS

A number of methodological approaches for assessing systems do exist: black box approach, modular approach, procedural approach, statistical approach, and modelling approach. They can be applied in a single manner or combined with each other. Each of these approaches has a different focus on a system, e.g., the black box approach assesses only the relevant inputs and outputs of the black box (system), without considering details of the system itself; whereas the procedural approach focusses on the assembly of the system. As such, depending on the approach, the relevance of the defined attributes (impact of assembly, number of parts, % of identical parts) for classifying and assessing the systems might vary. For example, if the impact of assembly is large, the procedural approach should be included, due to its focus on the assembly and installation of the system. Modular and modelling approaches can cover the different situations regarding number of parts, % of identical parts, and variations in conditions (usage, operational), as they use calculation methods to assess the systems efficiency based on data and information of the parts and the design parameters.

4. EXAMPLE OF REGULATING SYSTEMS: WATER PUMP UNIT

A water pump consists of several parts, and some are already regulated in the EU; such as the hydraulic part (Commission Regulation (EU) 547/2012) and the electric motors (Commission Regulation (EU) 2019/1781). Products placed on the market also have to meet a certain minimum efficiency, expressed as minimum efficiency index (MEI). In the revision of the water pump regulation, it is proposed to extend the scope to a 'water pump unit', i.e. the hydraulic part (pump), the electric motor and the VSD.

The efficiency requirements for the water pump unit are based on an energy efficiency index (EEI). Even though the use of a VSD is not explicitly mandated, the EEI requirement will be set so that they can only be met by water pumps with a VSD. The preparatory study for the review of the regulation estimates the savings in the EU at around 40 TWh/year by 2030 (Maya-Drysdale et al. 2018). This is an order of magnitude higher than for water pumps only (3,3 TWh/year). In this case a VSD ensures that load variations are matched by adjusting motor speed instead of using throttling values. In the event of fixed load applications, adjusting the water pump to the required load point can be done via motor speed control instead of pump trimming. Furthermore, the study indicates that testing methods for water pump units are available. The main issue to be solved is then the verification and enforcement. If a manufacturer places a water pump unit on the market, this unit has to comply with the requirements and verification set by market surveillance authorities. However, the scope of the revised regulation also includes water pump units with a water pump, an electric motor, and a VSD – each individually placed on the market – assembled and installed later on the location. The issues are identifying the actor(s) that put water pump units into service, and verifying these on location, especially when some EU market surveillance authorities do not have the legal powers to visit installations.

5. CONCLUSIONS

This paper highlighted the main challenges that arise when expanding the focus of product policy to regulate the energy efficiency systems. Although methodological approaches to assess systems do exist, their applicability needs to be checked on a case basis. Key challenges identified are related to the verification procedures of systems; as these will (in most cases) have to deal with the quality of the overall assembly. For example, in the case of a water pump unit, it will be difficult to check whether a VSD is included in the assembled and installed system, because there is no registration of the installed systems. Setting requirements on efficiency for systems can also be challenging when systems operate in a large range of conditions. Finally, limitations due to the regulatory powers in certain jurisdictions and of some market surveillance authorities needs to be considered. Based on the main findings and challenges discussed in this paper, a set of specific recommendations for regulating systems are summarized in Table 2.

Tab. 2: Mapping systems and regulatory solutions.

System class	Main elements of energy efficiency measures		
	Scope and addressees	Efficiency metrics & requirements	Verification & test methods
1: impact of assembly: small-medium; small number of parts	Manufacturers of (parts of) the system.	Efficiency of the parts and of the system.	Measurements on the parts of the system; modelling to provide results for the system (in a variety of use conditions).
2: impact of assembly: small-medium; large number of parts with a large% identical parts	Manufacturers of the parts.	Efficiency of the parts.	Measurements on the parts.
3: impact of assembly small-medium; large number of parts with a small % of identical parts	Manufacturers of the identical and/or critical* parts of the system. Assemblers/installers of the system.	Efficiency of the (identical/critical) parts. Efficiency of the system as assembled and installed.	Measurements on the (identical/critical) parts. Modelling to calculate system efficiency as assembled and installed.
4: impact of assembly: large; small number of parts	Manufacturers of the parts. Assemblers/in-stallers of the system.	Efficiency of the parts. Quality (control) of the assembly/installation.	Measurements on the parts. Check on the quality (control) of the assembly/installation.
5: impact of assembly: large; large number of parts	Assemblers/installers of the system.	Quality (control) of the assembly/installation.	Check on the quality (control) of the assembly/installation.

* critical with regard to energy consumption of the system.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is an extract from work of the Systems Policy group of the 4E Energy Efficient End-Use Equipment Program: <https://www.iea-4e.org/projects/energy-using-systems>. The paper is the sole responsibility of the authors; it does not reflect the views of the Systems Policy group, of 4E or of the IEA.

REFERENCES

- Maya-Drysdale, L., Vølcker Andersen, U., Huang, B., Gydesen, A., Viegand, J., van den Boorn, R., Aarts, S., Wierda, L. & Kemna, R. (2018) Ecodesign Pump Review.
- van Tichelen, P., Chung Lam, W., Waide, P., Kemna, R., Vanhooydonck, L. & Wierda, L. (2016) Preparatory study on lighting systems.

CONTACT INFORMATION:

Dr. Adriana Diaz
Schwindgasse 4/2; 1040 Vienna
Email: diaz@ecodesign-company.com

Die Digitalisierung des Energieaudits

G. Hofer, J. Rammerstorfer, A. Stipsits
e7 energy innovation & engineering, Wien, Österreich

ABSTRACT: The energy transition requires a completely new approach to energy. In order to significantly reduce CO₂ emissions, it is not only necessary to switch to CO₂-free energy, but the energy demand must be significantly reduced. This is the only way to meet future demand without CO₂ emissions. To achieve this, many new paths must be taken. Since 2014, the Energy Efficiency Directive has required large companies throughout the EU to conduct an energy audit every 4 years.

With the amendment to the Energy Efficiency Act in Austria, it is expected that the number of energy audits will increase, as additional companies will be obliged to carry out energy audits. At the same time, not only large companies will be affected by this obligation. In order to keep the costs of energy audits low, the digitalisation of the energy audit is essential.

In the context of energy audits, many activities are carried out for which a digitised energy audit could provide relief. For example, taking photos during the inspection and assigning them to technical systems or automatically creating a report based on the collected data. The aim of the developments was to reduce the effort through digitalisation and at the same time to increase the quality of the energy audit.

The result of the R&D project was a sustainable solution that now makes it possible to focus more on analysis and recommendations and to significantly reduce administrative and organisational work. A web-based tool with an app for the on-site inspections was developed, which primarily enables a far-reaching standardisation of the activities of the energy experts in accordance with the requirements of the EN 16247/ISO 50002 energy audit standards. This leads to efficient, time-saving project processing. At the same time, the tool increases the quality of the analysis, and economically sensible measures are more easily identified, evaluated - and finally implemented. All in all, this improves the cost-benefit ratio of the energy audit from the client's point of view.

Finally, a business model was also developed in the project. The software can now be tested free of charge on the website www.yessa.io or a user licence can be purchased for the web-based tool.

1. EINLEITUNG

Seit 2014 müssen alle Großunternehmen EU-weit alle 4 Jahre ein Energieaudit durchführen. Ein Energieaudit ist eine systematische Inspektion und Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs einer Anlage oder eines Gebäudes, mit dem Ziel, Energieflüsse und das Potenzial für Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren. Durchgeführt wird diese Analyse meistens von Expertinnen und Experten von Ingenieurbüros. Das Wiener Unternehmen e7 hat im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht, wie weit man den Prozess des Energieaudits durch Digitalisierung beschleunigen und dabei auch die Qualität heben kann.

Die Energiewende verlangt einen neuen Umgang mit der Energie. Um die CO₂-Emissionen zu reduzieren, bedarf es nicht nur einen Umstieg auf CO₂-freie Energie, sondern es muss der Energiebedarf gesenkt werden. Nur so kann der zukünftige Bedarf CO₂-frei gedeckt werden. Dazu müssen viele neue Wege eingeschlagen werden. Seit 2014 wird durch die Effizienzrichtlinie EU-weit von Großunternehmen verlangt, dass alle 4 Jahre ein Energieaudit erstellt wird. Ein Energieaudit ist entsprechend der EN 16247-1 eine systematische Inspektion und Analyse des Energieansatzes und des Energieverbrauchs einer Anlage, eines Gebäudes, eines Systems oder einer Organisation mit dem Ziel, Energieflüsse und das Potential für Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren und über diese zu berichten (Abb. 1).

SCHRITT 1	Bestandserhebung
SCHRITT 2	Analyse der Energieverbrauchs-struktur
SCHRITT 3	Begehung und Begutachtung repräsentativer Standorte und Prozesse samt Maßnahmenidentifikation
SCHRITT 4	Energietechnische und ökonomische Bewertung der Maßnahmen
SCHRITT 5	Energieauditbericht für das Unternehmen und Bericht an Monitoringstelle

Abb. 1: Prozess nach EN 16247-1 und nach EEffG

Letztlich sollen dadurch Effizienzpotenziale erkannt und auch umgesetzt werden. In vielen Fällen handelt es sich um No Cost- und Low Cost Maßnahmen. Diese Potenziale werden oft betriebsintern nicht in Ihrer Relevanz erkannt, aber können durchaus 10 bis 20 % an Reduktion des Energieverbrauchs ausmachen.

Oftmals wird diese Tätigkeit durch die Expertinnen und Experten von Ingenieurbüro durchgeführt. Diese haben sich an formale Anforderungen der Berichterstellung zu halten. Zusammen mit Partnern hat das Wiener Unternehmen e7 im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht, wie weit man den Prozess des Energieaudits durch Digitalisierung beschleunigen und dabei auch die Qualität heben kann.

ZIELE UND UMSETZUNG

Das Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik e7 aus Wien, hat sich diesbezüglich die Frage gestellt, wie weit die Prozesse der Datenerfassung bis zur Berichterstellung digitalisiert werden können. Ziel sollte es sein, nicht nur die Prozesse zu beschleunigen, sondern auch die generelle Qualität der Auditberichte durch Standardisierung dort, wo es möglich ist zu erhöhen. Der Auditbericht dient primär dazu, den Verantwortlichen in dem auditierten Unternehmen aufzuzeigen, welche Energiekosteneinsparpotenziale vorhanden sind.

e7 führt jährlich mehr als 15 Energieaudits durch und hat dadurch umfangreiche Erfahrung mit der ersten Verarbeitung der bereitgestellten Daten, der Informationserfassung im Rahmen der Begehung (Dokumentation) aber letztlich dann auch mit der Berichterstellung. Die Frage war, welche Schritte können standardisiert und digitalisiert werden. Jedes Objekt, jede Organisation und jedes Audit haben spezifische und individuelle Eigenheiten, auf die eingegangen werden muss.

Bei einem üblichen Audit können sich EnergieauditorInnen nicht nur auf ihre Kernkompetenz und ihr Know-how konzentrieren. Es wird sehr viel Zeit mit der Dokumentation der Situation, der Zuordnung von Notizen zu Gewerken und Fotos, mit dem Kopieren von Daten und Analysen aufgewendet. Bei dem engen Kostenrahmen bei Energieaudits bleibt für die Expertise nur mehr wenig Zeit.

Um die Idee umzusetzen, wurde 2018 gemeinsam in einem Konsortium mit dem Softwareentwickler Quarto Software und MT Consulting ein Innovations-Projekt im Rahmen des Programmes COIN der FFG erfolgreich beantragt. Die Schiene COIN zielt darauf ab, die Forschungs- und Innovationstätigkeit von Unternehmen, vor allem von KMU, zu stimulieren und zu erhöhen. Zu den Zielen zählen insbesondere, Innovationen auszulösen, die für den Markt bzw. für die Unternehmen neu sind (COIN „Netzwerke“). Projektstart war der Oktober 2018, die Laufzeit 24 Monate.

Um ein möglichst breites Wissen über den Zugang zu erhalten und auch nicht nur die eigene Sichtweise zu verfolgen, wurde auch mit anderen Ingenieurbüros kooperiert oder das Gespräch geführt. Das Technische Büro Holzinger aus Wien war Projektpartner, weitere Experten wurden in der Bedarfsanalyse und im Rahmen von Prototyptests eingebunden.

2. METHODISCHE GRUNDLAGEN

Für die Erreichung des angestrebten Projektergebnisses durch ein Netzwerk von Unternehmenspartner, war eine Vielzahl von Methoden und Lösungsansätzen in den folgenden Bereichen erforderlich:

- Entwicklung eines Geschäftsmodells
- Softwarebeschreibung
- Softwareentwicklung

Im Folgenden werden die wesentlichen methodischen Ansätze, die im Rahmen des Projekts zur Anwendung kommen werden, kurz dargestellt.

2.1 ENTWICKLUNG EINES GESCHÄFTSMODELLS

Zu Beginn des Projektes wird das Geschäftsmodell mit Hilfe der Methode des „Business Model Canvas“ nach A. Osterwalter spezifiziert.

Methodisch soll das Geschäftsmodell für das zu entwickelnde Software-Tool im Zuge mehrerer Workshops erarbeitet werden. Zu diesen Workshops werden unterschiedliche Stakeholder, und zwar sowohl Netzwerkpartner im engeren Sinn als auch externe EnergieauditorInnen und externe IT ExpertInnen eingeladen. Im Ergebnis liegen die Eckpunkte des Geschäftsmodells vor und finden unmittelbaren Eingang in das Detaildesign der Software-Lösung.

2.2 BESCHREIBUNG DER FUNKTIONEN DER SOFTWARE AUF BASIS DER SOFTWARE REQUIREMENT SPECIFICATIONS (SRS)

Die Methode zur Softwarebeschreibung orientiert sich an der internationalen Normung, konkret an der ISO/IEC/IEEE 29148:2011“ Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering“. Diese Norm beschreibt die Methode und die Inhalte von Software Requirements Specification. Dieses Dokument gibt – mit Fokus auf der Vergabe der Software-Programmierung an Dritte – die folgende Struktur vor:

- External interface
- Functions
- Usability requirements
- Performance requirements
- Logical database requirements
- Design constrains
- Software system attributes
- Supporting information

Da im Fall des gegenständlichen Projekts die Softwareentwicklung nicht an Dritte vergeben wird, sondern durch einen der Projektpartner realisiert wird, wird das Dokument gemeinsam, in einem kommunikativen Prozess, in dem alle Netzwerkpartner – wengleich in unterschiedlichem Ausmaß – einbezogen sind, erstellt (kooperative Softwarebeschreibung).

2.3 METHODE DER SOFTWARE-ENTWICKLUNG

Die Programmerstellung erfolgt im gegenständlichen Projekt nicht nach dem „Wasserfallmodell“, sondern im Sinne einer agilen Softwareentwicklung. Dabei werden insbesondere prozessrelevante und benutzerbezogene Funktionen bereits in frühen Projektphasen in Prototyp-Versionen der Software umgesetzt, damit sie von den zukünftigen AnwenderInnen evaluiert werden können – und anschließend sofort angepasst, ergänzt bzw. verbessert werden können. So wird verhindert, dass sich größere oder kleinere Missverständnisse durch den gesamten Entwicklungsprozess hinziehen. Der modulare Aufbau des Tools mit einem Grundprozess und angelagerten Sub-Modulen bietet gute Voraussetzungen für die Verwendung dieses interaktiven und inkrementellen Ansatzes der Software-Entwicklung.

Die Erarbeitung der Inhalte, die Entwicklung des Geschäftsmodells, die Festlegung der Softwarebeschreibung und insbesondere die Programmierung, das Testen und Validieren der Software läuft nach einem standardisierten Schema ab. Dieses Schema ist für das Projekt die Roadmap bis zur Fertigstellung der Software.

Ausgehend von den in der Softwarebeschreibung definierten fachlichen und technischen Anforderungen werden die benötigten Softwarekomponenten erarbeitet und die Softwarearchitektur definiert. Im nächsten Schritt wird festgelegt, welche Funktionen durch bestehende, selbsterstellte oder zugekaufte Komponenten abgedeckt werden können und welche Komponenten zu programmieren sind.

Außerdem erfolgt die technische Umsetzung des Datenmodells und die Erstellung des Programmcodes, sowie die Festlegung und Durchführung von Komponenten- und Integrationstests.

Im Zuge der Entwicklung werden auch die erforderlichen Mechanismen für das Software-Deployment (Installation) und Datensicherung implementiert. Nach der Erstellung des Prototyps wurden Tests von AnwenderInnen durchgeführt, welche auf die Praxistauglichkeit der Anwendung abzielen. Erkenntnisse daraus werden in die Software eingearbeitet und erneut überprüft.

3. ERGEBNISSE

Im Rahmen der Entwicklung wurden einige Vorgaben zur Software definiert. Diese wurden und werden laufend erarbeitet und optimiert. In der folgenden Auflistung werden die Vorgaben mit konkreten Umsetzungsbeispielen aus der Software dargestellt und beschrieben.

Vorgabe war unter anderem:

- Vereinfachte Erfassung von Bestandsanlagen im Zuge der Vor-Ort-Erhebung. Dazu wurde ein eigenes offline App entwickelt, welches u.a. die Fotoaufnahme direkt mit Objektdaten verknüpft.

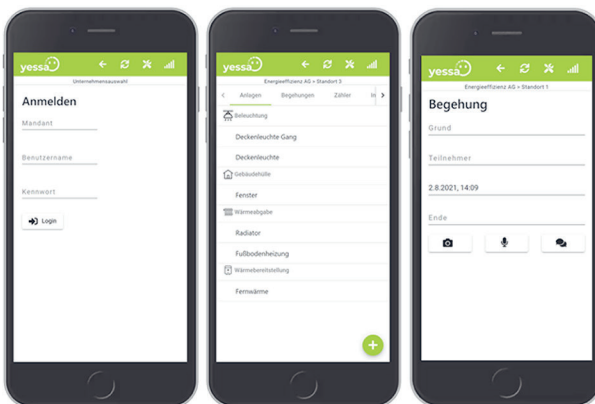


Abb. 2: yessa App-Anwendung

- Rasche und einfache Erfassung und Auswertung von analogen Zählerdaten und Verbrauchswerten, die in der Energieauditpraxis weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Bei der Auswertung sind bereits die ersten graphischen Aufbereitungen dabei.
- Analyse von Lastgängen: Gemäß EN 16247/ISO50002 muss ein Energieaudit im Regelfall eine Analyse von zeitlich stark disaggregierten Lastgängen (z.B. von Zählerdaten) umfassen. In vielen Fällen unterbleibt diese Aufgabe, da Energieauditorinnen und Energieauditoren oft nicht über das erforderliche Wissen und die nötigen Tools verfügen.

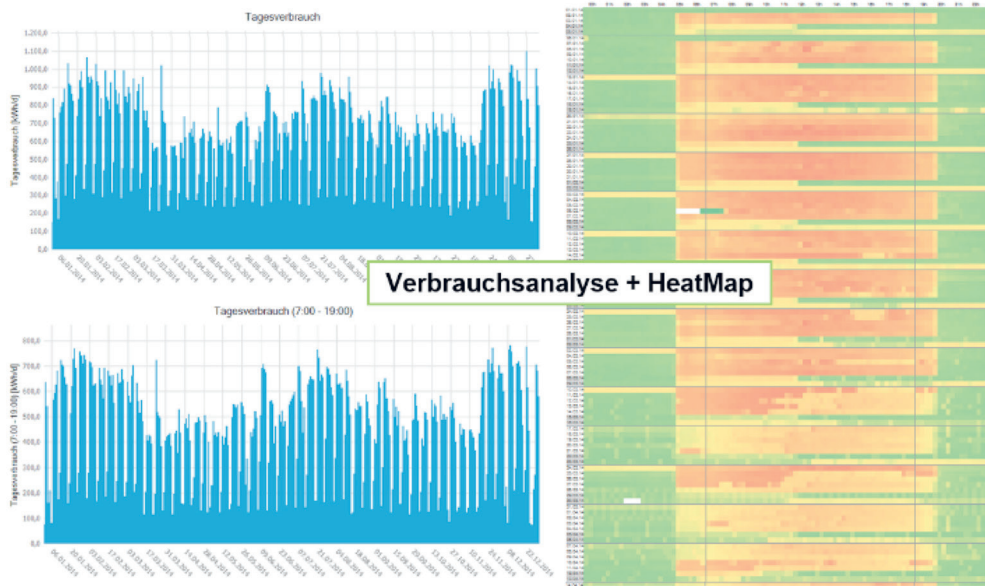


Abb. 3: Lastganganalyse

- Module zur Identifizierung und Bewertung typischer Maßnahmen bei ausgewählten Gewerken (z.B. Klimatisierung, Lüftung, Warmwasser):
- Integration von Standardmaßnahmen: Bei fast jedem Audit gibt es Maßnahmen und Empfehlungen, die sich in fast allen Audits wiederholen, jedoch wichtig für die Verantwortlichen im Unternehmen sind, um Entscheidungen für deren Umsetzung treffen zu können.
- Standardisierte Einsparbewertung und ökonomische Evaluierung typischer Maßnahmen: Gerade in der Abschätzung von zu erwartenden Energieeinsparungen gibt es bei vielen Energieaudits gravierende Qualitätsdefizite, da geltende Normen, wie zum Beispiel die EN 16212 zur Berechnung von Energieeinsparungen, nicht eingehalten werden. Ähnliches gilt für die ökonomische Bewertung von Maßnahmen.
- Automatische Befüllung von standardisierten Berichtsvorlagen, um ressourcenschonendes Reporting sicherzustellen und um gleichzeitig die Reports direkt mit den zugrunde liegenden Basisdaten und –annahmen zu verknüpfen.

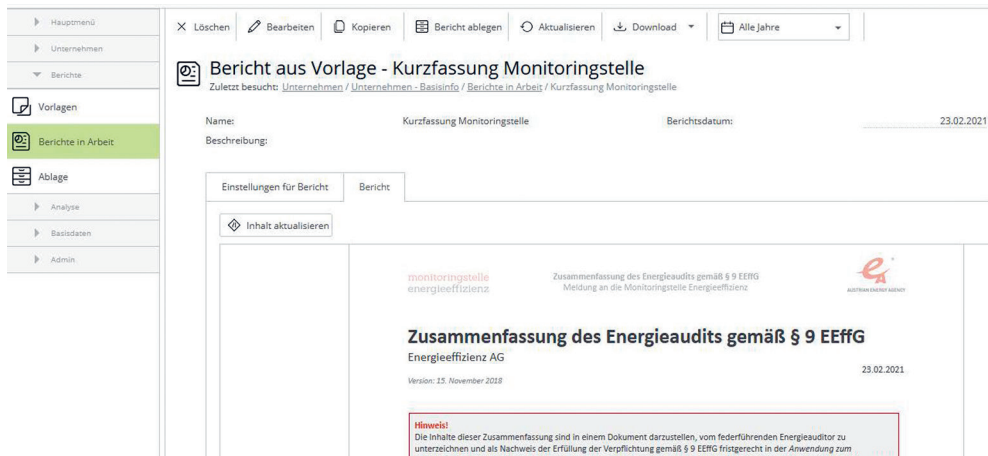


Abb. 4: Berichte auf Knopfdruck

- Dynamische Investitionsrechnung von Energieeffizienz-Maßnahmen
- Mandantenfähigkeit: Erfassung mehrerer Unternehmen (Mandanten) mit jeweils einem oder mehreren Standorten
- Teamfähigkeit: alle Kollegen des Unternehmens und (mehrere) Auditoren im Team können Zugriff auf die Audits/Berichte erhalten. Kollaboration bei der Auditerstellung ist möglich.
- Keine SW Installation/Maintenance notwendig da Webservice, nur Browser als Voraussetzung

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das Ergebnis des Forschungsprojektes war eine nachhaltige Lösung, die nun ermöglicht den Fokus verstärkt auf die Analyse und Empfehlungen zu setzen und die administrativen und organisatorischen Arbeiten deutlich zu reduzieren. Es entstand ein webbasiertes Tool mit einer App für die Vor-Ort-Begehungen, welches in erster Linie eine weitgehende Standardisierung der Tätigkeiten der Energieexpertinnen und Energieexperten entsprechend den Vorgaben der Normen EN 16247/ISO 50002 Energieaudits ermöglicht. Dies führt zu einer effizienten, zeitsparenden Projektbearbeitung. Gleichzeitig steigert das Tool die Analysequalität, und ökonomisch sinnvolle Maßnahmen werden leichter identifiziert, bewertet – und schließlich auch umgesetzt. In Summe verbessert sich somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Energieaudits aus Kundensicht.

Das Tool kann sowohl von Energieauditorinnen und Energieauditoren aber auch von Energiebeauftragten von größeren Unternehmen eingesetzt werden. Ebenso kann es Effizienzprojekte begleiten. Weitere Informationen zu diesem Tool sind auf der Website www.yessa.io zu finden.

LITERATUR

Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (Energieeffizienzrichtlinie). Brüssel, 2012.

Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund (Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEEffG), BGBl. I Nr. 72/2014. Wien, 2014.

ÖNORM EN 16247-1:2012 09 01. Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Austrian Stan-

dards, Wien, 2012.

ISO 50002:2014-07: Energieaudits - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. International Organization for Standardization, Genf, 2014.

ISO/IEC/IEEE 29148:2011 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering. International Organization for Standardization, Genf, 2014.

KONTAKTDATEN:

Gerhard Hofer

e7 energy innovation & engineering

Walcherstraße 11/43

1020 Wien

Email: gerhard.hofer@e-sieben.at

Session 4c

Intelligent Sensing and Control

PyroScanner – efficient measurement of solar transmission of windows and complex fenestration systems relying on a moving pyranometer

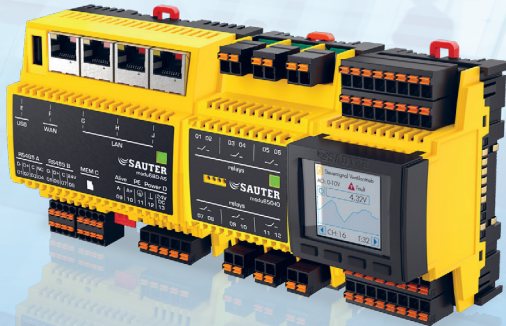
Rüdissler, Pertschy, Wagner / AEE INTEC / AT

Model Predictive Control for Mobile Refrigeration Systems: Challenges and Approaches

Fallmann, Poks, Kozek / TU Wien / AT

Vereint Leistungsstärke mit IoT-Architektur.

modulo 6



SAUTER modulo 6 schafft neue Standards in der Gebäudeautomation.

Leistung

- ▶ Verarbeitung grosser Datenmengen bei kleinsten Abmessungen
- ▶ Hohe Speichertiefe für historische Datenaufzeichnung
- ▶ Hohe Verarbeitungs- und Reaktionsgeschwindigkeit

Integration

- ▶ BACnet/IP
- ▶ Feldbus-Protokolle: Modbus, MBus, KNX, BACnet MS/TP
- ▶ Vereint die Gewerke Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Elektroversorgung zu einem stabilen und sicheren Gesamtsystem

Sicherheit

- ▶ Integrierte Netztrennung von Internet und Gebäudetechnik
- ▶ Webserver mit verschlüsselter Kommunikation
- ▶ BACnet-SC-fähig
- ▶ Integrierte Benutzer-Authentifizierung
- ▶ Rückverfolgbarkeit aller Benutzereingriffe Dank Audit Trail

Bedienung

- ▶ Integrierter Webserver moduWeb Unity für den Betrieb
- ▶ Via Smartphone über Bluetooth für Inbetriebnahme und Wartung
- ▶ Lokale Bedieneinheit «LO» mit hochauflösendem, grafischem Farbdisplay für Vorrangbedienung (EN ISO 16484-2)

IoT und Cloud

- ▶ Integration von IoTs mit MQTT
- ▶ Datensicherung via MQTT in der Cloud
- ▶ Cloud-Services für Regelung, Betrieb und Engineering

Investitionsschutz

- ▶ Rückwärtskompatibel zu modulo 5
- ▶ Ermöglicht die Modernisierung bestehender Systeme in budget-träglichen Etappen
- ▶ Lange Verfügbarkeit

Mehr Information:

www.sauter-controls.com

Systems
Components
Services
Facility Services

 **SAUTER**
Für Lebensräume mit Zukunft.

PyroScanner – efficient measurement of solar transmission of windows and complex fenestration systems relying on a moving pyranometer

D. Rüdisser

TU Graz und AEE Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Austria

R. Pertschy, W. Wagner

AEE Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: As a consequence of modern high insulation standards and constantly rising proportion of glass surfaces in modern buildings, the significance of solar gains of transparent surfaces in the façade, i.e. shaded or un-shaded glazings, have risen dramatically within recent decades. However, the methods to model or measure this essential and often dominant component of the energy balance of a building still lack significantly in accuracy. The complexity of the objects and incoming radiation as well as the relatively large dimensions are the main obstacles for empirical methods. We have developed an innovative approach to perform such measurements with low-cost equipment in real-world environments. The measurement setup is designed in a way that allows deployment for in-situ measurements. In the present publication we provide details of our measurement setup as well as first results of the measurements carried out with the prototype device. Our measurement principle relies on a moveable pyranometer mounted on a light-weight 3-axis CNC router, an external pyranometer as well as on a statistical evaluation method. The optimal measurement track for the scanner is determined in a specially developed algorithm based on non-linear numerical optimization. The entire measurement system is controlled by a specially programmed and integrated low-cost microcontroller unit and a dedicated web application. The deployment to an in-situ measurement location therefore only requires a WiFi entry point. We have tested our prototype on a triple glazed window, unshaded and shaded by venetian blinds with different slat angles. Diurnal cycles of primary solar transmittance are measured for various weather conditions and the total solar transmittance is derived. The measurement performed covers all practically relevant effects, such as shading and reflection by the window reveal, multiple reflections or ground reflections. From the effective solar direct transmittance, we derive effective g-values. The measurements reveal in a clear and insightful way the substantial variation of effective transmittance values depending on the cloud coverage and angle of the sun. We have further designed a calorimetric setup to validate our radiometric measurements by means of measuring a different physical quantity. In order to be able to measure the relatively low energetic impact on the room with high accuracy and especially with little latency, we have developed a measurement configuration relying on a balance system of liquid-based cooling and electric heating. The validation results show a high correlation and good absolute match between the two measurement systems for measurements with high solar-gains, but lack in accuracy for low solar gains.

1. INTRODUCTION

Amid global warming and considering that buildings account for a large share of the total energy consumption, the significance of highly accurate energetic models for buildings is continuously rising. In contrast to the detailed methods to describe and measure heat transmission through the building envelope, the models and measurements methods for solar gains through shaded and unshaded windows are still strongly simplified and lack in accuracy. This is especially relevant for complex fenestration systems (CFS) and generally all types of modern and non-standard shading and glazing devices.

Due to the increased insulation standards and the increased proportion of glazed surfaces, the energetic impact on the whole building energy balance is significant and even dominant in many cases. In mid-latitudes solar gains can substantially raise thermal comfort and energy efficiency in winter while having potentially adverse effects on thermal comfort and energy demand in summer. To maximize the beneficial effects of solar gains and mitigate any negative impacts, an optimized control of shading devices based on accurate models is essential. This, in turn, requires detailed and precise knowledge of the energetic behaviour of the combined shading / glazing system. The theoretical as well as the empirical determination of total solar transmittance of transparent elements is a challenging task. Modelling the systems according to standard approaches (CEN 2018; ISO 15099) based on single reflectance values of venetian blind surfaces usually causes significant errors and cannot be applied to other types of shading devices. Measuring the energetic key component of solar direct transmittance is challenging as well. Only few very elaborate testing facilities are available. Even though the expensive measurements rely on complex equipment such as solar simulators (Kuhn 2014), large test cells (CEC & BBRI 1990), water tanks (Bednar 2020) or large integrating spheres (Kessel 1986; Kessel & Selkovitz 1984), they are still not able to fully capture the transient energetic behaviour under real-world conditions.

In general, it can be said that optical/radiometric measurements can be carried out with less effort and are more accurate. When the testing specimens are window-elements the challenge is however to capture the entire transmitted radiation. For this purpose, we have developed a new approach relying on differential measurements using a moveable pyranometers indoors and a stationary pyranometer outdoors. A statistical evaluation approach is used to finally derive the solar direct transmittance of many locally measured sample values.

2. RADIOMETRIC MEASUREMENT

2.1 PRINCIPLE AND DEVICE

Our measurement setup relies on two pyranometer units. The outdoor unit consists of a pyranometer mounted parallel to the plane of the window element and in close distance. Optionally, additional pyranometers or sun-trackers can be used outdoors to characterize the incoming radiation better, especially to determine the direct/diffuse proportion.

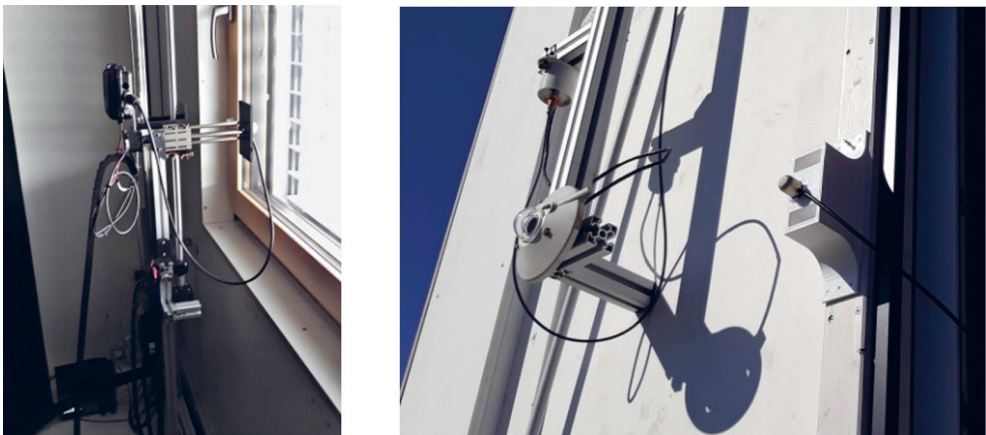


Fig. 1: left: PyroScanner prototype, right: colocation-calibration of int./ext. pyranometers

The indoor pyranometer is mounted on a platform that can move freely behind a window. This is realized by a self-developed light-weight 3-axis lead-screw router platform, as used in CNC manufacturing. To operate the complex measurements, we have implemented a framework of specialized software with various programming languages comprising microcontroller-firmware (in C+), a web-service (in PHP), a web-client (javascript/html) and evaluation software (in FPC/Lazarus). Our PyroScanner prototype currently features two different operation modes: a *point-mode* with stationary measurements for extended time periods at changing positions and a *tracking-mode* in which the indoor pyranometer is moving constantly and measurements are taken on the fly. In this paper we will focus solely on the tracking-mode. For this mode only 2D-movements parallel to the window plane are required, however it has to be ensured that the pyranometer is able to cover most of the window reveal surface. If the reveal area is marginally larger than the transparent surface of the window, the top, bottom and lateral window reveal faces should be covered with a highly reflective surface to ensure that radiation hitting these parts is reflected back into the scan area of the pyranometer. If the pyranometer is able to move in short distance to the glazing, or if the scan area is larger than the transparent surface, these boundary effects can be neglected.

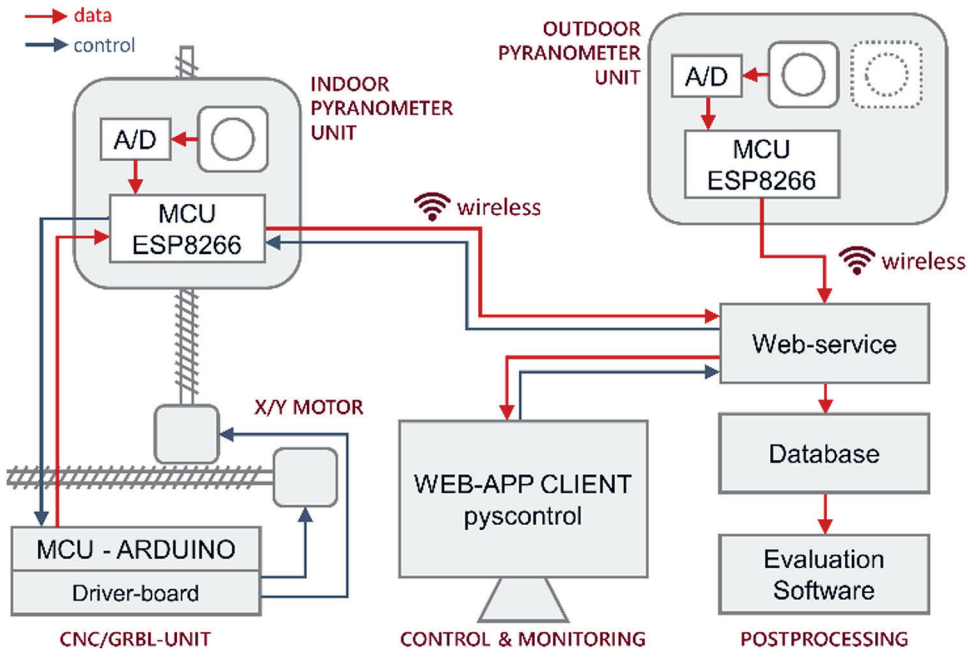


Fig. 2: PyroScanner - schematic of data-flows

2.2 THEORY/EVALUATION

Unlike most other methods we do not aim at detecting the whole incoming radiation at once, but calculate the total transmittance based on a statistical mean value. According to the central limit theorem of statistics this mean value will converge quickly to the expectation value, as long as the quantity of measurement samples is sufficiently large and as long as these samples are only subject to statistical errors. The effects of random statistical variations in the measurement samples, mainly caused by changing cloud coverage, will be diminished quickly by the averaging process.

In order to distinguish the derived time-dependent transmittance values, subject to real-world effects, such as variation of cloud-coverage and reveal shading, we denominate them as *effective* values. We define the effective solar direct transmittance as $\tau_{e,eff}$ as the quotient of the total transmitted radiant power P_{int} to the incident power P_{ext} . Related to a transparent reference area A_{ref} we can write:

$$\tau_{e,eff} = \frac{P_{int}}{P_{ext}} = \frac{P_{int}}{E_e \cdot A_{ref}} \quad (1)$$

With E_e and E_i being the external and internal irradiance measurement readings. Following our statistical approach, we can define the effective solar direct transmittance as time dependent function by means of the rolling averages over the most recent N discrete measurement readings E_e and E_i of a full scan cycle.

$$\overline{\tau_{e,eff}}(t) = \frac{\overline{P_{int}}(t)}{\overline{E_e}(t) \cdot A_{ref}} \quad (2)$$

$$\overline{P_{int}}(t_X) = \frac{1}{N} \sum_{i=X-N+1}^X E_{i,i} \cdot A_i \quad (3)$$

$$\overline{E_e}(t_X) = \frac{1}{N} \sum_{i=X-N+1}^X E_{e,i} \quad (4)$$

A related effective total solar transmittance g_{eff} can be estimated when the secondary internal heat transfer factor q_i is calculated based on EN 410 (CEN 2011):

$$\overline{g_{eff}}(t) = \overline{\tau_{e,eff}}(t) + q_i \quad (5)$$

To achieve valid results and avoid systematic errors the choice of the scanning path is essential. On the one hand, the path should be highly symmetric and cover the entire scan area uniformly, on the other hand it should cover the entire width and height within short time periods. To meet this contradictory requirements, several possible parametric track designs were conceived in a first step. In the second step the parameters defining the track were optimized using the non-linear optimization algorithm simulated annealing (Kirkpatrick 1983). As optimization cost function e a combination of the maximum and root mean square distance of any points p_i in the reference area was chosen:

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(p_i)^2} + \frac{1}{2} \max(d(p_i)) \rightarrow \min \quad (6)$$

With p_i being the discrete points of the incidence area A_{int} in a 1x1 mm grid, whereas the function d provides the shortest distance of a point to the scanning path.

In our prototype case the incidence area of interest A_{int} (corresponding to the reveal area) was marginally larger than the potential scan area A_{scan} on three sides (due to mechanical restrictions). On the top side there was a significant margin, as the scanner could not reach the top of the reveal. However, with the approach chosen such restrictions can be considered in the optimization process of the scanning track. The final, optimal track for the PyroScanner is depicted in Fig. 3. It can be seen, that there is a concentration of the path in the top area to compensate for the locally larger top margin.

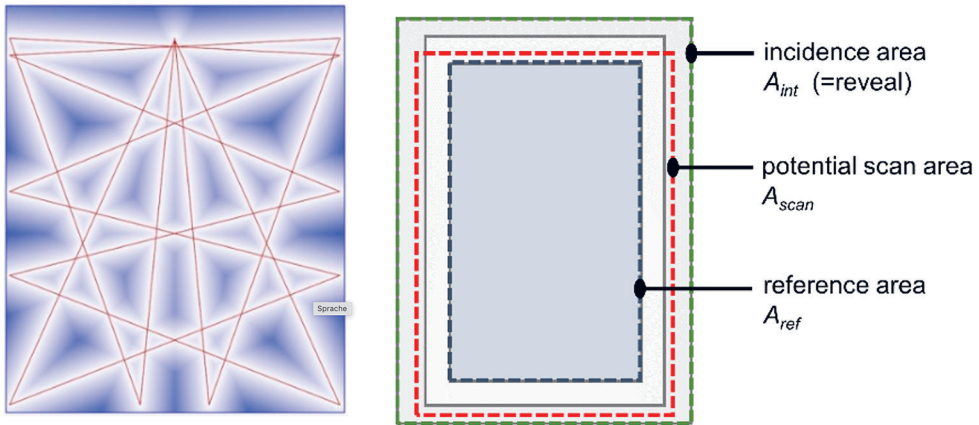


Fig. 3: left: optimized scanning path (white/blue gradient indicates distance to path), right: overview of relevant areas.

In a postprocessing step after the measurement subareas A_i are assigned to each measurement spot using the shortest distance function d . The subareas are used as weighting coefficients to finally determine the effective direct solar transmittance according to equation 3. A visual representation of the sub-area division is depicted in Fig. 4. Since measurements are taken “on-the-fly” there is a variation in the measurement timing, which in turn leads to slight deviations in the position of the actual measurement samples. Consequently, the entire subdivision process is carried out for each(!) measurement individually.

The entire measurement cycle lasts 799 seconds and comprises 230 measurement spots.

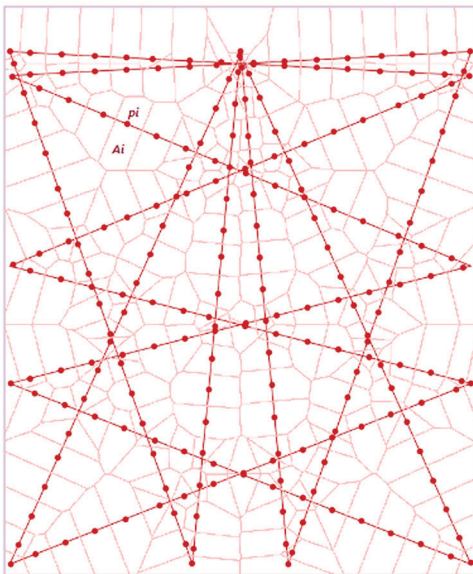


Fig. 4: Subarea assignment for measurement samples

3. CALORIMETRIC VALIDATION MEASUREMENTS

The PyroScanner for radiometric measurement was set up in the facade test box on the laboratory roof of AEE INTEC. The facade test box offers extensive possibilities to control and measure a variety of relevant energy flows. For the validation of the radiometric measurement, a system was set up that allows a calorimetric measurement of the transmitted solar power through the test window. A requirement of this method is that the effects of thermal masses are minimized, since the latency of the radiometric measurements is only few minutes (defined by the scan duration).

To keep the effect of thermal mass minimal, the temperatures of the enclosing surfaces are kept constant. The temperatures of the individual enclosure surfaces are controlled individually via hydraulic circuits. In order to keep them minimal, the control fluctuations are compensated by several cascaded electric heaters.

The key component is an electric radiator, controlled by a fast PID controller. Additionally, fans are used to mix the air to achieve a homogeneous temperature distribution. The air temperature is kept at a defined spread higher than the temperature of the enclosings. The thermal mass of the radiator is comparably small, therefore any changes in the room air temperature due to solar gains can quickly be compensated. As a result, any power input through the window will reduce the power consumed by the radiator. The reduction of the radiator power therefore directly corresponds to the solar gains.

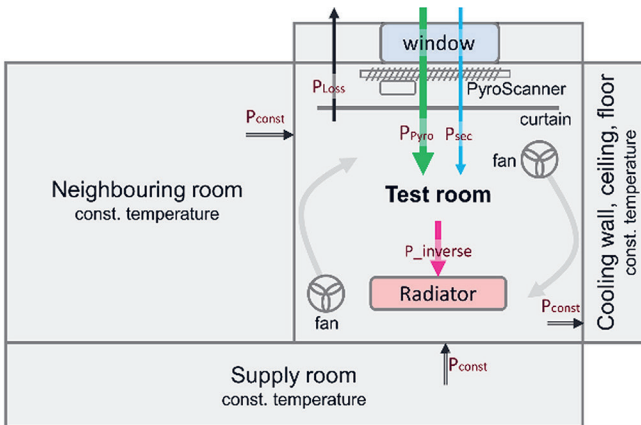


Fig. 5: calorimetric setup to validate our radiometric measurements

In order to calculate the solar transmitted power, the inverse radiator power is introduced as an auxiliary quantity:

$$P_{inverse} = P_{const} - P_{Radiator} \quad (7)$$

The constant power over the surfaces is a constant offset resulting from the temperature difference between the radiator and the enclosing. For the evaluation the value determined once a day at 4 a.m. before the sun-set, when a steady state has established. In order to calculate the solar gains, the transmissive losses through the unconditioned exterior wall, the window frame and glazing have to be considered. Dynamic thermal simulations were performed with the software HTflux (HTflux 2021) based on the actual the indoor temperature, outdoor temperature and solar irradiance on the façade. The transmissive losses can be used to derive the target quantity of the calorimetric measurements:

$$P_{calorimetric} = P_{inverse} + P_{Loss} \quad (8)$$

As a reference value the power determined in the radiometric method is used and the secondary internal heat gain is added to calculate the total solar gains:

$$P_{\text{radiometric}} = P_{\text{Pyro}} + P_{\text{sec}} \tag{9}$$

4. RESULTS

The test specimen consisted of a triple glazing unit with two standard low e-coatings in the layers 2 and 5. According to the manufacturers calculation based on EN 410 (DIN EN 410) the solar direct transmittance T_e of the IGU is 47%, whereas the internal heat transfer factor is 6 %, resulting in a total solar energy transmittance (g-value) of 53 %. The window was shaded with Z-shaped venetian blinds with rounded borders mounted on the exterior side. The blind width dimension l was 93.5 mm and the blind spacing 75.5 mm. The PE-coated surface of the blinds with silver appearance has a nominal total solar diffuse reflectance value of 59,9 %. The reveal/incident area A_{int} was 1.809 m² (1.238 x 1.461 m), while the (transparent) reference area A_{ref} was 1.250 m² (1.225 x 1.020 m). The window orientation during the measurement was precisely south.

4.1 RADIOMETRIC MEASUREMENTS

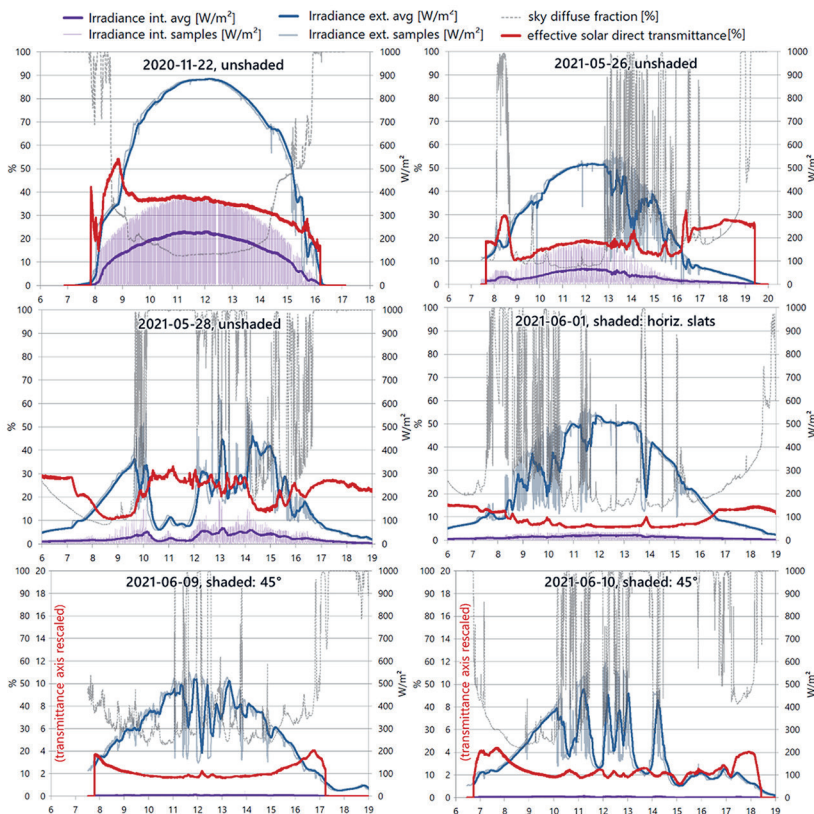


Fig. 6: radiometric measurements: raw irradiance data, processed irradiance data and calculated effective solar direct transmittance for 6 diurnal cycles with different dates and shading situations

The first measurements and evaluation results using our PyroScanner in tracking-mode showed very promising results. It can be seen how the averaging of the measured irradiance samples (thin curves) is able to provide stable results (thick curves). The calculated effective solar direct transmittance (red curves) based on eqn. 2 reveals the diurnal changes depending on the sky condition and solar angle. The values achieved range from 40 % (on November 22) to only 2 % when the window is shaded with a 45° slat angle in June.

The bottom two charts in Fig. 6 demonstrate the capability of the approach chosen. Even on changing cloud coverage and very small (single-digit) internal irradiance values the evaluation process results in consistent, reproducible and smooth transmittance values ranging from 2 % to 4 % depending on the solar angle.

4.2 CALORIMETRIC / RADIOMETRIC MEASUREMENTS

Four synchronous measurement runs using both methods were carried out on days with different sky and shading conditions.

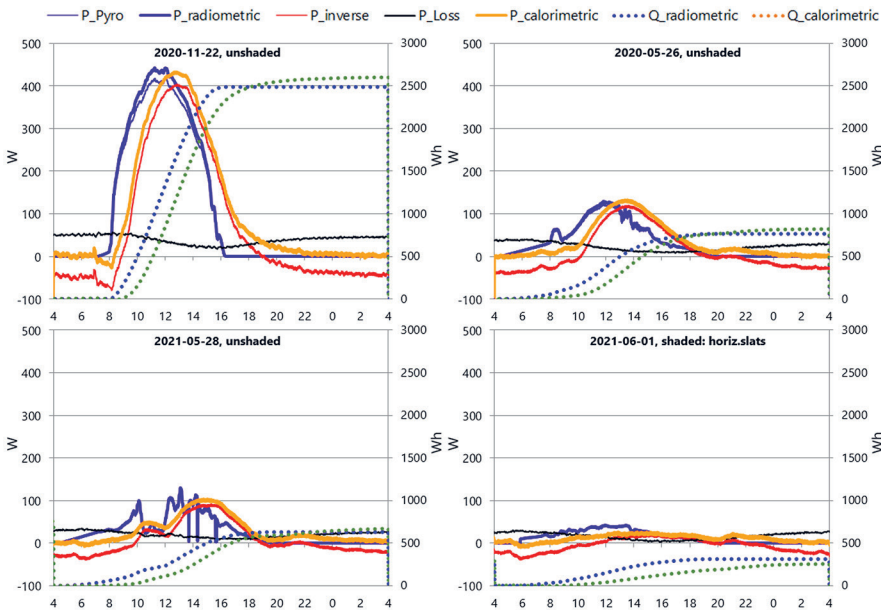


Fig. 7: radiometric and calorimetric measurement results for four diurnal cycles with different dates and shading situations

Tab. 1: comparison of total energies measured

Date	Shading	Q_radiom. Wh	Q_calorim. Wh	Abs. dev. Wh	rel. Dev. (calor./radi.) %
22.11.2020	unshaded	2488	2602	114	4,6
26.05.2021	unshaded	764	820	56	7,3
28.05.2021	unshaded	628	669	41	6,5
01.06.2021	horiz. slats	312	256	-56	-17,9

Calorimetric measurements are a challenging task. Our measurement setup is able to provide good results when high levels of radiation are transmitted into the room. The relative deviation between the two methods was only 4.4 % on Nov. 22nd, when a total of approx. 2500 Wh solar gains entered the room. The highest deviation can be found on June 1st with 17.9 %. Due to the shading with horizontal slats and the cloud coverage on this day the total solar gains were only approx. 300 Wh. A meaningful calorimetric measurement of fully shaded cases with tilted slats (as shown in the bottom row of Fig. 6) is currently not possible, as the total solar gains for these days were only approx. 60 Wh and therefore range in the order of magnitude of the measurement-error.

5. CONCLUSION AND OUTLOOK

We have designed, built and tested a new system, which allows low-cost measurement of windows and shading devices in real-world environment with good accuracy. The first results already reveal interesting information on the performance of the shading device and demonstrate the dynamic character of the transmission properties of a glazing element. The calorimetric measurement results match well for cases with high solar gains, but fails to determine cases with low solar gains. The radiometric PyroScanner method however, is still able to provide consistent and stable results for such cases.

Currently multiple months of measurements performed with the point-mode of the PyroScanner are being evaluated and compared against a detailed ray-tracing simulation model (Rüdisser 2021). The simulation results will provide additional information to further enhance the accuracy of the measurements. The main function of the PyroScanner will be to provide few measurement sets under real-world conditions that can then be used to calibrate (or validate) the simulation model. The calibrated simulation model can then be used to extend the measurement results, i.e. to calculate the solar transmittance for any given time, location, orientation and climate zone of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

The PyroScanner has been developed in the course of the PhD project of Rüdisser (2021) that is funded by the Austrian Promotion Agency (FFG) in the programme *Forschungspartnerschaften*. The calorimetric measurement method and validation measurements were carried out in SCIN project funded by the COIN programme of the Federal Ministry for Digital and Economic Affairs. We gratefully acknowledge the support.

REFERENCES

- Bednar, T. (2020) Determination of total energy transmittance of glazing systems at the building site. *Res. Build. Phys.*, 613–616.
- CEC & BBRI (1990) The PASSYS Test Cells: A COMMON EUROPEAN OUTDOOR TEST FACILITY FOR THERMAL AND SOLAR BUILDING RESEARCH. Commission of the European Community (CEC)
- CEN - European Committee for Standardization (2018) EN ISO 52022-1, Energy performance of buildings - Thermal, solar and daylight properties of building components and elements.
- CEN - European Committee for Standardization (2011) EN410, Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- DIN EN 410-201104 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen.
- HTflux (2021) HTflux simulation software, HTflux GmbH. www.htflux.com.
- ISO 15099 - Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations, International Organization of Standards, I.S.O. (2003).

- Kessel, J. (1986) Transmittance Measurements in the Integrating Sphere. *Appl. Opt.*, 25, 2752–2756.
- Kessel, J., and Selkowitz, S.E. (1984) Integrating Sphere Measurements of Directional-Hemispherical Transmittances of Window Systems. *Illum. Eng. Soc. Annu. Tech. Conf.*
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P. (1983) Optimization by simulated annealing. *Science* (80-), 220 (4598), 671–680.
- Kuhn, T.E. (2014) Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady-state laboratory measurements. *Energy Build.*, 84, 388–402.
- Rüdissler D. (2021) Radi-Cal. (ongoing PhD Thesis, unpublished yet, AEE INTEC, Graz University of Technology, funded by FFG Forschungspartnerschaften – industriennahe Dissertationen).

Model Predictive Control for Mobile Refrigeration Systems: Challenges and Approaches

M. Fallmann, A. Poks & M. Kozek
TU Wien, Vienna, Austria

ABSTRACT: This work outlines a comprehensive model and a sophisticated predictive control strategy for compressor-powered cooling units mounted in mobile, small-scale cooling chambers. The investigated system comprises several cooling units to improve failsafe performance and utilizes an extended refrigeration architecture extending control options. Due to door openings and the possibility of turning the compressor and the fan on and off, the mathematical model contains continuous and binary variables. A completely distributed model predictive approach is suggested to overcome computational bottlenecks and increase the failsafe performance of the overall concept. This paper provides a rough understanding of the topics mentioned above for a broad audience. References guide the interested reader to more detailed considerations.

1. INTRODUCTION

In the last decades, air conditioning has become an ever-greater energy consumer. Growing world population combined with increasing demand for pleasant room climate and almost global cold chains for food transportation yield high carbon dioxide emissions. Although cooling units consume enormous amounts of energy during their lifetime, widely-used control algorithms for these applications are usually simple, most often only rely on room temperature measurements, and are designed and operated without appropriate models of the surroundings.

While linear model predictive approaches are well studied (Rawlings & Mayne 2009; Wang 2009), including binary decision variables (e.g., turning the cooling unit on/off) requires appropriate extensions and represents a highly topical challenge (Bemporad & Morari 1999; Borrelli et al. 2017). Since state-of-the-art refrigerated trucks are often equipped with several cooling units to improve reliability and because such optimizations determining continuous and binary inputs require enormous computing capacities, distributed control has gained interest in recent years (Jia & Krogh 2001; Camponogara et al. 2002; Nebenborn et al. 2006; Moroşan et al. 2010).

In the following, a model predictive control algorithm in a distributed formulation is outlined. It considers given temperature limits while minimizing overall energy consumption. A comprehensive model of a refrigerated truck, including door openings, serves as a basis for control design.

2. CHALLENGES

While refrigerated transportation of goods entails various challenges from a control engineer's point of view, customers' needs form the origin – see Fig. 1. Firstly, cargo temperature should remain within a specific range to inhibit waste of perishable goods and extend its shelf life (Fig. 1a). Secondly, customers constantly want to improve the overall system's efficiency to reduce costs on the one hand and to lower their environmental footprint on the other hand. As most classic control approaches merely take the temperature into account, they lack appropriate strategies to consider energy consumption (Fig. 1b).

However, control design requires extending these two overarching goals depending on the given system architecture. In order to serve application in a broad field by a single truck concept, a sophis-

ticated control scheme should be able to handle a varying number of mounted cooling units (Fig. 1c). Thus, it is possible to cover trucks that, e.g., operate in the north of Europe and may need two refrigeration units and vehicles used in a region close to the equator and therefore may need four. Fulfilling this requirement is also vital for the failsafe performance of the overall system. In this sense, the algorithm should still perform adequately, although one or more cooling units exhibit a fault (Fig. 1d).

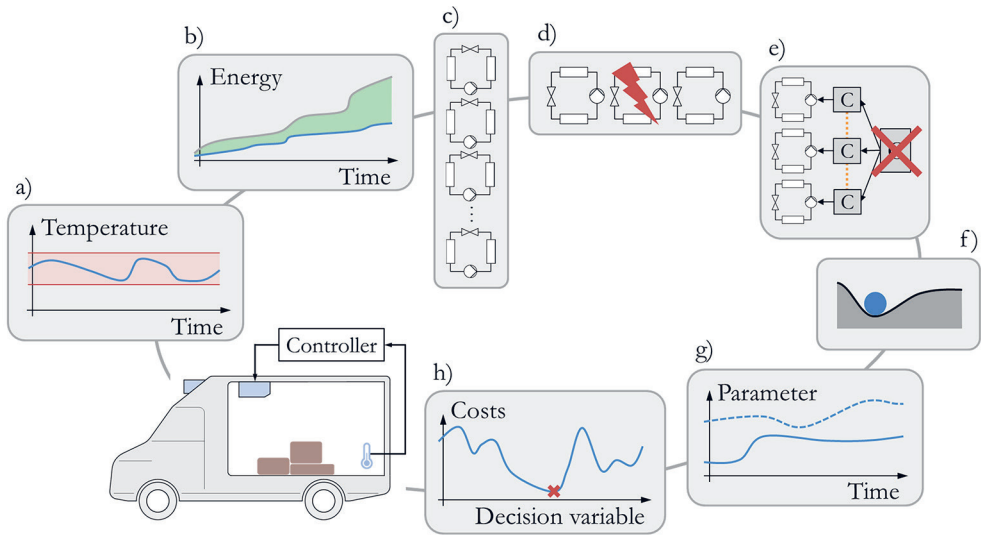


Fig. 1: Requirements to a sophisticated control scheme for mobile refrigeration systems: (a) keeping cargo temperature within a specific range, (b) increasing efficiency compared with state-of-the-art operating strategies, (c) handling a varying number of cooling units, (d) managing faulty refrigeration units, (e) offering fail-safety by applying distributed controllers, (f) exhibiting asymptotic stability of the closed-loop, (g) providing robustness in the face of parameter changes, and (h) ensuring global optimality despite applying a distributed approach.

To further improve reliability in such a multi-unit setup, separate controllers should manage each cooling unit independently. While some state-of-the-art approaches use an additional global controller or several identical globally acting agents to ensure an optimal workload distribution (Luchini et al. 2019; Poks 2021), information exchange between local agents allows an entirely distributed setup if designed appropriately (Fig. 1e). Especially if considering such communication among controllers, it is of particular importance to keep track of and ensure the closed-loop system's asymptotic stability (Fig. 1f).

Furthermore, the algorithm should be robust in the face of slight parameter changes (Fig. 1g). For example, a very likely source of it in mobile cooling applications is degradation or damage of the insulation (Luchini et al. 2018).

Finally, although the proposed concept is acting on a purely local level, communication among controllers should yield a solution at or at least sufficiently close to a global optimum (Fig. 1h).

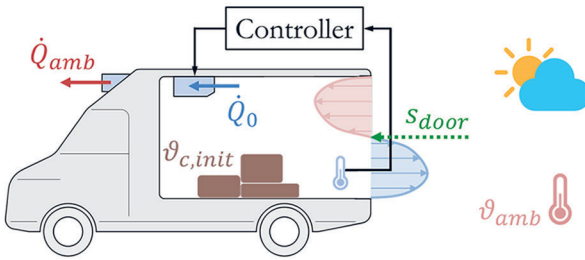
3. SYSTEM DESCRIPTION

In order to apply appropriate methods, fulfilling the challenges mentioned above, detailed system insight is inevitable. Fig. 2 depicts the investigated system. The air temperature inside the cooling chamber ϑ_{cc} experiences various disturbances, see Fig. 2a. Since real insulations still conduct heat, ambient

temperature ϑ_{amb} is one of those. Although weather conditions and the initial cargo temperature $\vartheta_{c,init}$ at the loading time also influence temperature evolution inside the chamber, the control model neglects explicit incorporation of these effects due to their large number of unknown and time-variant parameters. However, door openings (s_{door}) have the most significant impact on the inner air temperature compared with the other disturbances. Despite that, most current approaches only cover them heuristically or by a pre-defined heat flow (Luchini et al. 2020). By contrast, the proposed modeling approach explicitly incorporates door openings and models them as an actual connection between the cooling chamber and the ambient air (Lafaye de Micheaux et al. 2015).

In contrast to widely-used cooling units, the investigated one exhibits an extended architecture (Fig. 2b). In addition to the fundamentally needed refrigeration circuit, the second loop uses a mixture of water and glycol as its coolant. This extension increases the system’s flexibility as the water-glycol mixture may serve as a cold reservoir. Nonetheless, complexity remains on a reasonable level because the fluid in there is in its liquid state at all times. In contrast to typical applications, not the evaporator but only the air chiller is mounted inside the cooling chamber. At this very point, the heat flow \dot{Q}_0 causes cooling of the air inside the chamber. This system structure comes along with superior advantages: on the one hand, the refrigerant cannot contaminate any goods within the storage room as it is isolated by the water-glycol cycle in between. On the other hand, the storage effect of the glycol-water mixture offers the opportunity

a) Refrigerated vehicle



b) Refrigeration unit

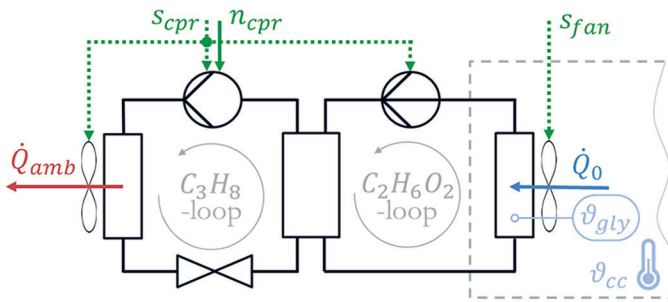


Fig. 2: Schematic illustration of (a) a refrigerated vehicle with disturbances acting upon it and (b) the structure of the investigated cooling unit. The cooling device comprises a classic refrigeration loop using propane (C_3H_8) as its coolant and a storage loop driven by a mixture of water and glycol ($C_2H_6O_2$). Quantities important for understanding and modeling are labeled appropriately according to the following listing. Temperatures: air inside the cooling chamber ϑ_{cc} , ambient air ϑ_{amb} , cargo at the time of loading $\vartheta_{c,init}$, glycol inside air chiller ϑ_{gly} . Heat flows: into the atmosphere \dot{Q}_{amb} , cooling capacity \dot{Q}_0 . Binary inputs: door opening s_{door} , compressor switch s_{cpr} , fan switch s_{fan} . Continuous input: compressor speed n_{cpr} .

towards a more flexible operating strategy with a strong focus on both temperature limits and overall efficiency. Therefore, to fully utilize the system's functional scope, a suitable control concept defines the compressor speed n_{cpr} , the compressor switch s_{cpr} , and the fan switch s_{fan} at every time step.

As the system incorporates binary and continuous variables, associated models are denoted as *hybrid* (Bemporad & Morari 1999; Borrelli et al. 2017). The given system architecture allows formulating a set of affine models. Every combination of the three binary inputs (s_{cpr} , s_{fan} , and s_{door}) presents a certain mode $i(t)$ with its continuous-time state-space representation according to:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}^{i(t)} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^{i(t)} \begin{bmatrix} n_{cpr}(t) \\ \vartheta_{amb}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{f}^{i(t)}, \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}^{i(t)} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}^{i(t)} \begin{bmatrix} n_{cpr}(t) \\ \vartheta_{amb}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{g}^{i(t)},\end{aligned}\tag{1}$$

where

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \vartheta_{gly}(t) \\ \vartheta_{cc}(t) \\ \vartheta_{w1}(t) \\ \vartheta_{w2}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \vartheta_{cc}(t) \\ P_{el}(t) \end{bmatrix},\tag{2}$$

with the state vector x , the output vector y , the temperatures of the insulation ϑ_{w1} and ϑ_{w2} , and the electrical power consumption of the refrigeration unit P_{el} . Other quantities are matrices (A, B, C, D) or vectors (f, g) of appropriate size, resulting from physical modeling and parameter identification. Please note that f and g render the otherwise linear model affine.

As the control concept determines binary and continuous variables (manipulated variables: n_{cpr} , s_{cpr} , and s_{fan}), a mixed-integer solver, e.g., Gurobi (Gurobi Optimization 2021), is necessary. To incorporate the switched-affine model dynamics (1) into an optimization problem, they have to be translated into a set of inequalities. A common and helpful tool for such a translation is HYSDEL (Torrisi & Bemporad 2004).

4. DISTRIBUTED HYBRID MODEL PREDICTIVE CONTROL SCHEME

Distributed control schemes that aim towards a solution sufficiently close to a global optimum require appropriately designed communication among controllers, see Fig. 3 and for a comprehensive overview (Camponogara et al. 2002). Each control agent solves a local optimization problem to define:

$$\Phi = \begin{bmatrix} U_c \\ U_l \end{bmatrix}\tag{3}$$

with the sequence of continuous manipulated variables U_c and logical ones U_l within the horizon. While actual formulation depends on users' preferences, the objective function J_{total} can be written in the form:

$$J_{total}(\Phi) = \Phi^T P_1 \Phi + P_2 \Phi + P_3\tag{4}$$

with the matrix P_1 , vector P_2 , and the scalar value P_3 . Please note that these matrices and the scalar value embody actually chosen temperature and energy objectives and are therefore application-dependent. Besides model dynamics, various constraints can be considered as well. The overall problem incorporates them by inequalities, stated as:

$$G_1 \Phi \leq G_2(x(0), V_c, V_l) \tag{5}$$

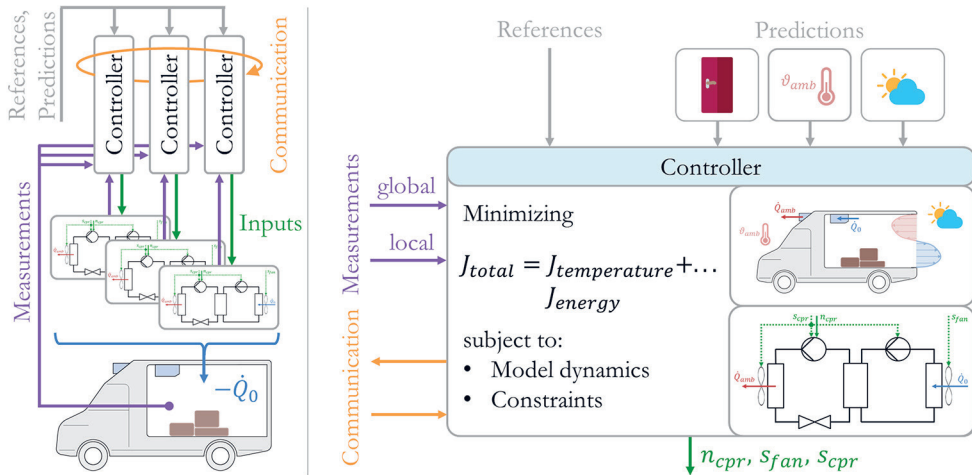


Fig. 3: Schematic of the distributed control concept (left) in its general view and (right) focusing on a single controller’s workload. Each controller determines manipulated variables by minimizing an objective function J_{total} based on given references, predictions (door opening, ambient temperature, and weather conditions), global and local measurements, and communication with other agents.

where G_1 and G_2 result from the chosen restrictions and the system model and V_c and V_l denote sequences of continuous and binary predictions, respectively. These prediction vectors also contain communicated values between agents. Solving this problem yields the optimal solution:

$$\Phi^* = \arg \min_{\Phi} J_{total} \tag{6}$$

Extracting and applying the first values of the optimal input sequences U_c^* and U_l^* complete the workload during a single time step.

Design of the communication among controllers is vital to ensure robustness and stability of the overall concept. Actual dynamics highly influence possible communication options. A promising and straightforward possibility communicates each cooling unit’s planned cooling capacity at the beginning of every time step (Jia & Krogh 2001; Groß 2013). After that, each agent runs its local optimization based on knowledge about the other agents’ plans. However, as the plans may vary from step to step, only suboptimal results are achievable. Furthermore, rapid plan changing from at least one agent can yield unstable behavior. To overcome this issue, plan-changing penalties provide stability but also minimize performance (Dunbar 2007).

Another possibility is to run several optimizations in every time step and communicate intermediate results to all other agents. Although the computational advantage of the distributed approach is shortened in such a framework, optimal results sufficiently close to the global optimum are achievable (Negenborn et al. 2006).

This setup promises to meet temperature restrictions better and decrease overall energy consumption compared with standard control approaches for refrigerated trucks. A detailed comparison of various aspects is subject to current investigations.

5. CONCLUSIONS

Transporting perishable goods by refrigerated trucks entails numerous challenges for controlling cargo temperature. Obeying temperature restrictions while simultaneously offering high efficiency requires sophisticated control schemes. Providing redundancy by applying several cooling units within a single truck renders the control problem even more complex. A modeling approach explicitly incorporating door openings offers a more comprehensive insight into system dynamics and allows a more flexible control strategy compared with standard approaches. The presented outline of a distributed model predictive control scheme shows operators' significant advantages in keeping better track of temperature restrictions and increasing overall efficiency. Both are associated with economic favors.

Besides its usage in mobile cooling applications, apparent system similarities to stationary systems, e.g., air conditioning of wall-coupled rooms (Moroşan et al. 2010), promise advantages of the proposed scheme in a broad field.

ACKNOWLEDGMENTS

The continuing support and assistance of Filip Kitanoski, Dominik Radler, Ferdinand Nittnaus, and Stefan Schönhofer (PRODUCTBLOKS GmbH in Korneuburg, Austria) in experimental investigations and data acquisition are gratefully acknowledged.

This work was supported by the Austrian Research Promotion Agency (original German name: Forschungsförderungsgesellschaft) by the project *DiNaMiC* [grant number 871303].

REFERENCES

- Bemporad A. and Morari M. (1999) Control of Systems Integrating Logic, Dynamics, and Constraints. *Automatica* 35, 407-247.
- Borrelli F., Bemporad A., and Morari M. (2017) *Predictive Control for Linear and Hybrid Systems*. New York; United States of America: Cambridge University Press.
- Camponogara E., Jia D., Krogh B.H., and Talukdar S. (2002) Distributed model predictive control. *IEEE Control Systems Magazine* 22, 44-52
- Dunbar W.B. (2007) Distributed Receding Horizon Control of Dynamically Coupled Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 52, 1249-1263.
- Groß D. (2013) *Distributed Model Predictive Control with Event-Based Communication*. Dissertation, Kassel University Press.
- Gurobi Optimization, LLC (2021) *Gurobi Optimizer Reference Manual*. <https://www.gurobi.com>
- Jia D. and Krogh B.H. (2001) Distributed Model Predictive Control. *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, June 25-27, 2001.
- Lafaye de Micheaux T., Ducoulombier M., Moureh J., Sartre V., and Bonjour J. (2015) Experimental and numerical investigation of the infiltration heat load during the opening of a refrigerated truck body. *International Journal of Refrigeration* 54, 170-189.

- Luchini E., Radler D., Ritzberger D., Jakubek S., and Kozek M. (2018) Model predictive temperature control and ageing estimation for an insulated cool box. *Applied Thermal Engineering* 144, 269-277.
- Luchini E., Schirrer A., Jakubek S., and Kozek M. (2019) Model predictive multirate control for mixed-integer optimization of redundant refrigeration circuits. *Journal of Process Control* 76, 112-121.
- Luchini E., Poks A., Radler D., and Kozek M. (2020) Model predictive temperature control for a food transporter with door-openings. *SICE Conference*, 2020.
- Moroşan P.-D., Bourdais R., Dumur D., and Buisson J. (2010) Building Temperature Regulation Using a Distributed Model Predictive Control. *Energy and Buildings* 42, 1445-1452.
- Negenborn R.R., De Schutter B., and Hellendoorn H. (2006) Multi-Agent Model Predictive Control of Transportation Networks. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing, and Control*, 296-301.
- Poks A., Luchini E., Fallmann M., Signor C., Wurzinger A., Radler D., Jakubek S., and Kozek M. (2021) Distributed hierarchical control for multiple refrigeration units. Submitted to *Thermal Science and Engineering Progress*.
- Rawlings J.B. and Mayne D.Q. (2009) *Model Predictive Control: Theory and Design*. Madison, Wisconsin; United States of America: Nob Hill Publishing.
- Torrisi, F.D. and Bemporad, A. (2004) HYSDEL – A tool for Generating Computational Hybrid Models for Analysis and Synthesis Problems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12, 235-249.
- Wang L. (2009) *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. Great Britain: Springer-Verlag London Limited.

CONTACT:

Markus Fallmann
TU Wien
Getreidemarkt 9/E325
1060 Wien, Austria,
Tel.: +43 (1) 58801 325523
Email: markus.fallmann@tuwien.ac.at

Session 5c

Effizienz und Komfort

Strategien zur Vermeidung von Viren und Feinstäuben in der Raumluft

Braunegg / ConsultAIR GmbH / AT

Energieeffizienz und Behaglichkeit in sanierten Bildungsbauten

Kendlbacher, Koch / IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH / AT

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

Rabensteiner / 4ward Energy Research GmbH / AT

Jasek / Forschung Burgenland GmbH / AT

Strategien zur Vermeidung von Viren und Feinstäuben in der Raumluft

Ch. Braunegg

ConsultAIR GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Viruses such as SARS-CoV-19 belong to the group of ultra-fine particles (UFP), which are small particles suspended in the air. According to the latest studies, UFP are already classified as more dangerous to health than cigarette smoke according to WHO criteria. UFP is distributed in the human body not only through the lung barrier through the bloodstream, but also reaches the brain directly through the olfactory nerves. Various health effects are the result.

The presentation serves to raise awareness and covers the following topics: Origin of UFP, distribution, effects, burdens on the human body, the inadequacy of the existing limits for PM (particulate matter) in relation to UFP, technical solutions for the reduction of UFP in indoor air and practical examples.

The virus SARS-CoV-19 also belongs to the UFP and can, like all other UFP, be removed up to 98 % from indoor air by suitable technical means.

The technical solutions for reducing UFP in indoor air also allow increased use of recirculated air in air handling units where this is allowed. This would enable large energy savings potentials at high (summer) and low (winter) outdoor temperatures, while at the same time greatly improving indoor air quality compared to conventional systems.

Currently, there are over 400 studies on particle toxicology and the health effects of UFP on the human body - and more are being published every month.

On the other hand, there are over 200 scientific studies proving the positive effect of air ions on human well-being or the healing effect in patients. Also an increase of up to 50 % of measurable cognitive and physical performance enhancement in humans has been described.

1. EINLEITUNG

Viren wie das SARS-CoV-19 gehören zur Gruppe der Ultra Feinstäube (UFP), also ultra-kleine Partikel die in der Luft schweben. UFP werden nach den neuesten Studien nach WHO Kriterien bereits als gesundheitsgefährlicher als Zigarettenrauch eingestuft. UFP verteilt sich im menschlichen Körper nicht nur über die Lungenschanke über die Blutbahn, sondern gelangt auch über die Riechnerven direkt in das Gehirn. Unterschiedlichste gesundheitliche Auswirkungen sind die Folge.

Der Vortrag dient zur Bewusstseinsmachung und behandelt folgende Themen: Entstehung von UFP, Verbreitung, Auswirkungen, Belastungen für den menschlichen Körper, die Untauglichkeit der bestehenden Grenzwerte für PM (particulate matter) in Bezug auf UFP, technische Lösungen zur Reduktion von UFP in der Raumluft und Praxisbeispiele.

Der Virus SARS-CoV-19 gehört auch zu den UFP und kann, wie alle anderen UFP auch, mit geeigneten technischen Mitteln bis zu 98 % aus der Raumluft abgebaut werden.

Die technischen Lösungen zur Reduktion von UFP in der Raumluft ermöglichen auch eine verstärkte Nutzung von Umluft in raumluftechnischen Geräten, wo dies zulässig ist. Damit ließe sich bei hohen (Sommer) und tiefen (Winter) Außentemperaturen große Energieeinsparungspotentiale heben bei gleichzeitig starker Verbesserung der Raumluft gegenüber herkömmlichen Systemen.

Derzeit finden sich über 400 Studien zum Thema Partikel Toxikologie und die gesundheitlichen Auswirkungen von UFP auf den menschlichen Körper - und es werden monatlich mehr.

Auf der anderen Seite gibt es über 200 wissenschaftliche Studien, die den positiven Effekt von Luftionisation auf das Wohlbefinden des Menschen oder die heilende Wirkung bei Patienten belegen. Auch die eine Steigerung von bis zu 50 % der messbaren kognitiven und physischen Leistungssteigerung beim Menschen wurde beschrieben.

2. ULTRA-FEINSTAUB - DAS PROBLEM

2.1 WAS IST ULTRA-FEINSTAUB?

Die Ultra-Feinstäube sind besonders kleine Teile und werden – wie alle Feinstäube – von der Luft getragen und mit der Luft in Räumen und in der freien Umgebung verteilt. Ultra-Feinstäube - kurz UFP genannt - bestehen aus verschiedensten organischen und anorganischen Substanzen wie zum Beispiel metallische Stoffe und Mikroorganismen wie Bakterien, Viren und Sporen und flüchtige organische Substanzen (VOC). Auch CORONA Viren (COVID-19 / SARS-CoV-2) zählen zu den UFP.

Von UFP spricht man ab einer Partikelgröße von ca. 0,1 μm Durchmesser und kleiner – als Vergleich ein Haar hat ca. 70 μm im Querschnitt – also einem Siebenhundertstel eines Haardurchmessers.

Viele Partikel kleiner als ca. 2,5 μm sind für den Menschen gefährlich und haben diverse gesundheitliche Schädigungen zur Folge. Allgemein kann gesagt werden: je kleiner desto gefährlicher. Partikel mit 0,3 μm dringen tief in die Lunge ein und ab Partikelgröße 0,1 μm gelangen Partikel in die Blutbahn und in das Innere des Körpers.

UFP (Durchmesser 0,1 μm und kleiner) machen nur ca. 10 % der Masse am gesamten luftgetragenen Staub aus (10 μm und kleiner), aber machen über 90 % der Anzahl aus. Das kleinste 1 % der Masse des luftgetragenen Staubes stellt 80 % der Oberfläche aller Feinstäube.

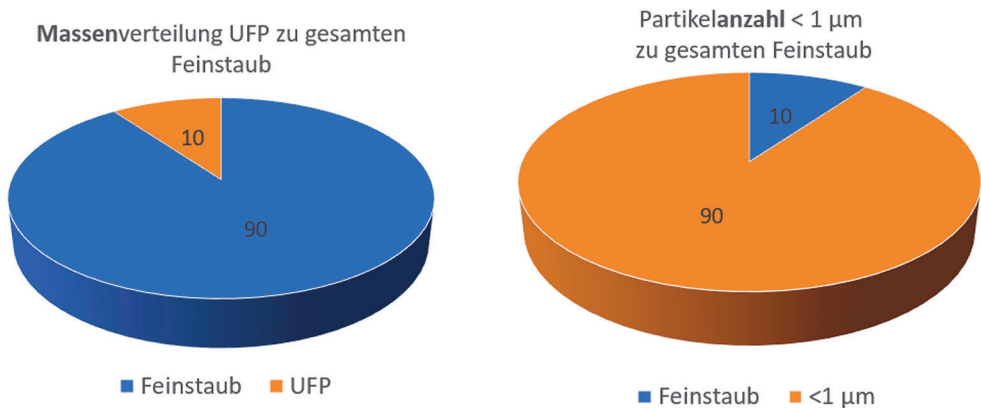


Abb. 1: Vergleich Verteilung UFP Masse und Partikelzahl (Brauneegg 2020)

UFP sind ein Bestandteil des Staubes in der Luft; es wird von luftgetragenen Partikeln gesprochen, d.h. diese werden mit der Luft transportiert und sind nicht schwer genug, um rasch zu Boden zu fallen. Ab ca. 10 μm und kleiner spricht man von Feinstaub, der im Allgemeinen leicht genug ist, um mit der Luft getragen zu werden. Zum Vergleich verhalten sich zwei Feinstaubpartikel mit derselben Dichte von 1 kg/dm^3 (Dichte von Wasser) die ca. 1,5 m über dem Fußboden schweben wie folgt: Das Partikel

mit einem Durchmesser von 5 μm braucht ca. 33 Minuten um zu Boden zu fallen, das andere Partikel mit 0,5 μm braucht ca. 41 Stunden (=Sedimentationszeit).

UFP ist unsichtbar, weil sehr klein und geruchslos, daher für den Menschen unbemerkt.

2.2 URSPRUNG DES ULTRA-FEINSTAUBES

UFP wird von der Natur und vom Menschen produziert. Natürlicher Ursprung des UFP sind u.a. Vulkane und Wüstenstaub. Der größte Teil entsteht jedoch durch Asphalt Abrieb (Khare et al., 2020), moderne Maschinen (z.B. Benzin und Dieselmotore, Flugzeugtriebwerke) oder sonstigen Techniken (z.B. Bremstechnologie) unter großem Druck und Hitze (Umweltbundesamt 2018; Rönkkö et al. 2017). Ein Dieselmotor von vor 30 Jahren hat weit weniger UFP ausgestoßen als ein moderner Diesel Motor, weil die Drücke und Temperaturen im Motor von heute viel höher sind.

Im innerstädtischen Bereich messen wir 40.000 und mehr luftgetragene Partikel pro Kubikzentimeter Luft. Im Schnitt atmet der Mensch 2 Liter pro Atemzug und macht in ruhiger, sitzender Haltung 14 Atemzüge in der Minute, wir atmen also ca. 30 Liter Luft in der Minute, also im innerstädtischen Bereich atmen wir pro Minute 1,2 mrd. Partikel und mehr! (Anmerkung: die alten Angaben bezogen sich auf die Größenordnung bis ca. 0,3 μm und größer, auf Grund der Messergebnisse vom NABEL (BAFU 2021) wissen wir, dass die Menge unter 0,3 μm ein tausendfaches ist.)

Weltweit gibt es nur noch wenige Gegenden, die nicht mit UFP belastet sind. Generell ist in allen Gegenden wo der Mensch lebt ein erhöhter Anteil an UFP, im innerstädtischen Bereich jedenfalls in einer gesundheitsschädlichen Anzahl, oftmals auch in ländlichen Bereichen.

2.3 WIE GEFÄHRLICH IST FEINSTAUB?

Wissenschaftlich erwiesen sind die gesundheitlichen Auswirkungen des UFP der über die Blutbahn im Körper verteilt wird. Diverse Entzündungsprozesse an Gefäßwänden, Arterienverkalkung, Blutgerinnsel, Herzkreislauferkrankungen, Lungenerkrankungen, Herzinfarkte und Entwicklungsstörungen bei Kindern sind nur einige Auswirkungen. Auch der Zusammenhang mit Demenz- und Alzheimererkrankungen ist nachgewiesen. Magnetit gelangt als Nanopartikel über die Luft in die Blutbahn und verbindet sich im Körper mit den körpereigenen Peptiden Amyloid 40 und 42 zu Fibrillen die sich im Gehirn ablagern. (Teller et al. 2015)

Neueste Erkenntnisse zeigen, dass der Ultra-Feinstaub nicht nur über die Lunge in das Gehirn, sondern sogar über die Nerven direkt in das Gehirn gelangen und auch der ungeborene Fötus betroffen ist (Bové 2019). Eine Studie vom März 2019 belegt, dass Ultra-Feinstaub nach WHO Kriterien gesundheitsschädlicher ist als das Tabakrauchen! (Lelieveld et al. 2019)

Aktuelle Studien aus China und den USA aus dem Jahre 2020 weisen einen direkten Zusammenhang zwischen der Luftverschmutzung und der COVID 19 Mortalitätsrate (Wu et al. 2020). Zum Beispiel war eines der Ergebnisse, dass ein Anstieg von nur 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei PM_{2,5} [Partikeln] mit einem 15 %igen Anstieg der Covid-19 Todesrate assoziiert ist.

2.4 DAS PROBLEM MIT DEN GESETZLICHEN RICHTWERTEN FÜR UFP

In Österreich werden Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte für UFP im Immissionsschutzgesetz Luft kurz IG-L festgelegt. Das Gesetz ist letztendlich eine Umsetzung der Richtlinie 2008/50/EG der europäischen Union über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Im IG-L ist unter § 3a festgelegt, dass bei PM_{2,5} (also UFP mit Durchmesser von max. 2,5 μm) der Wert von 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft nicht überschritten werden soll.

Diese Regelung greift zu kurz, weil UFP Grenzwerte Massenangaben (μg) sind - wie oben erwähnt - nicht aussagekräftig genug. In der Gruppe der PM_{2,5} Partikel sind alle Partikel erfasst bis zu einem Durchmesser von 2,5 μm also auch alle Partikel kleiner als 2,5 μm . Der Grenzwert von 20 μg pro m^3 Luft für PM_{2,5} entsprechen zum Beispiel 2,4 mio. Partikel der Größe 2,5 μm (bei einer Dichte von 1 kg/dm^3) oder aber 38 Mrd. (!) Partikel der Größe 0,1 μm - also das 15.600 fache!

3. REDUKTION VON UFP UND VIREN DURCH NEGATIVE IONEN

Das Verhältnis von UFP und negativ geladenen Ionen ist eine Konstante die der französische Mathematiker Bricard als das „Gesetz von Bricard“ aufgestellt hat, d.h. entweder viele Ionen und wenig UFP oder umgekehrt. Negativ geladene Ionen in der Atemluft sind wichtig für den menschlichen Organismus und fördern das Wohlbefinden (Hutter et al. 2011). Wenn der Anteil an UFP in der Luft hoch ist und damit der Anteil der Ionen gering ist, ist die Luft auch ungesund.

Ionen und Ozon reduzieren Gerüche und Mikroorganismen und flüchtige organische Substanzen in der Luft werden abgebaut. Die Atemluft wird hygienisch, sauber und gesund. Ionen „aktivieren“ die Luft, reduzieren den Ultrafeinstaubgehalt in der Luft und machen diese wieder natürlich und frisch.

3.1 DEFINITION UND WIRKUNG VON LUFT IONEN

„Luftionen sind einfach oder mehrfach positiv oder negativ elektrisch geladene Teilchen in der Luft, deren Größe im molekularen oder sogar atomaren Bereich liegen kann. Sie sind in unserer Umgebung mehr oder weniger, aber ständig vorhanden. Ihre Polarität und Anzahl sind durch Messungen, z.B. mit einem „Ionometer“ erfassbar. Luftionen entstehen durch Ionisation von Gasmolekülen. Hierbei entstehen ein positives Ion und ein freies Elektron. Das freie Elektron lagert sich an ein neutrales Molekül an und bildet so ein negatives Ion.“ (Varga & Mersch-Sundermann 2021)

3.2 ENTSTEHUNG VON LUFTIONEN

- Elektrische Entladung – Blitze
- Kosmische Strahlung (ionisierende Strahlung)
- Offene Feuer (Plasma)
- Wasserfalleffekt (Lenardeffekt): Zerstäubung und Deformation von kleinen Wassertröpfchen führen zu Polarisierung und Ladungsverschiebung und bilden Luftionen, auch „Ionendusche“!
- Piezoelektrische Effekte: hohe Drücke führen unter bestimmten Umständen bei bestimmten Kristallen zu einer Ladungsverschiebung und hohen Polarisationsfeldern.
- Natürliche Materialien mit hohen Polarisationsfeldern die bei Kontakt mit Luft Luftionen bilden, z.B. Turmaline
- Ionisatoren: künstliche Erzeugung mittels elektrischer Hochspannung

3.3 PHYSIKALISCHE WIRKUNG VON LUFTIONEN AUF DIE RAUMLUFT (UFP, VIREN AEROSOLE, GERUCH, ETC. ...)

Luftionen in der Raumluft führen zu einer Clusterung (Akkumulation) von feinen Partikeln wie auch UFP. Dadurch entstehen größere Teilchenverbände, welche durch ihr höheres Gewicht zu einer schnelleren Sedimentation (Absinken) führen. Dadurch wird auch die Ausfilterung dieser größeren Teilchenverbände über herkömmliche Filteranlagen möglich. Dieser Prozess ermöglicht die Reduktion von UFPs (organische und anorganische) bis zu 98 % aus der Raumluft.

Durch die Reduktion von UFP in der Raumluft (wie auch der organischen Anteile) wird die Gefahr der Ansteckung über sekundären Übertragungswege von luftgetragenen Viren (C19), Bakterien und Aerosolen reduziert.

3.4 WIRKUNG VON LUFTIONEN AUF LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND GESUNDHEIT MENSCHEN

Geeignete Systeme verbessern mit einfachen natürlichen Mitteln die Raumluft. Die Luft wird aktiviert und erhält so eine natürliche Qualität und ist nahezu keim- und geruchsfrei. Der Anteil der UFP kann messbar um bis zu 90 % gesenkt werden und die gesunden Negativen Ionen können in der Raumluft

erhöht werden langfristige gesundheitsschädigende Auswirkungen durch UFP können dadurch reduziert werden.

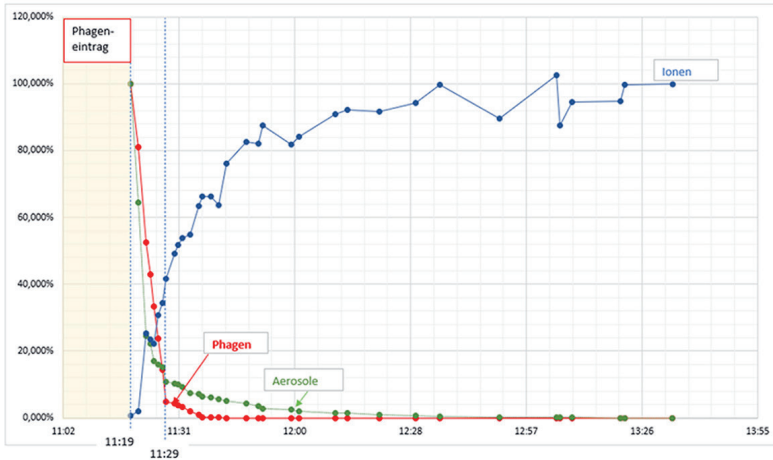


Abb. 2: Einfluss von Ionen auf Phagen und Aerosole, Messergebnisse Lehmann (2021)

Gleichzeitig wird die Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit des Menschen erhöht. Verschiedenste Studien dazu sprechen von Leistungssteigerungen von 10 % bis über 50 % - je nachdem was und wie der Studienfokus und die Messmethodik sind. (Hutter et al. 2011)

Weitere medizinisch nachgewiesene langfristige gesundheitsverbessernde Aspekte (vgl. Flory et al. 2010; Küster & Dittmar 1940; Moser et al. 2004) sind noch gar nicht berücksichtigt aber letztendlich für Arbeitgeber und Arbeitnehmer ein weiterer großer Vorteil.

3.5 IONEN UND REGELWERKE IM HOCHBAU

Abhängig von der Gebäudenutzung werden vom VDI Verein Deutscher Ingenieur folgende Orientierungswerte für die Anzahl von Ionen pro 1cm³ Raumluft angegeben:

Tabelle 1. Raumluftqualitäten und empfohlene Anwendungsbereiche

Bezeichnung	Raumluftqualität	Empfohlen für	Typische Anwendung
RAL 1	hoch	Räume, die von Personen mit erhöhtem Gesundheitsrisiko genutzt werden	Intensiv- und Pflegeräume mit besonderen Anforderungen
RAL 2	mittel/normal	Räume für dauerhaften ^{*)} Aufenthalt von Personen	<ul style="list-style-type: none"> Räume in Seniorenhäusern oder Kindergärten Räume in neu errichteten Gebäuden oder renovierte Räume mit Einfluss der Renovierung auf die Raumlufttechnik bzw. Raumluftqualität Räume mit besonderer Eignung für Allergiker
RAL 3	mäßig/moderat	Räume für dauerhaften ^{*)} Aufenthalt von Personen	Räume mit Raumlufttechnik im Bestand; keine Veränderung im Raum, die eine Luftqualitätsänderung zur Folge haben können
RAL 4	niedrig	Räume für zeitlich begrenzten Aufenthalt ^{**)}	<ul style="list-style-type: none"> Treppenträume Flure Lagerräume Nebenträume

^{*)} dauerhaft im Sinne des Anwendungsbereichs dieser Richtlinie
^{**)} nicht im Anwendungsbereich dieser Richtlinie

Orientierungswerte:

RAL 1	3000 Ionen / cm ³
RAL 2	1500 Ionen / cm ³
RAL 3	500 Ionen / cm ³
RAL 4	keine Anforderungen

Abb. 3: Orientierungswerte Ionen nach Gebäudenutzung, VDI 6022.

4. TECHNISCHE LÖSUNGEN ZUR REDUKTION VON UFP UND VIREN IN INNENRÄUMEN

Die in herkömmlichen Lüftungsanlagen eingesetzten klassischen Fein- und Feinststaubfilter sind aus physikalischen Gründen ungeeignet zur Ausfilterung von Partikel mit einer Partikelgröße von $0,2\ \mu\text{m}$ oder kleiner.

Herkömmliche Lüftungsanlagen reduzieren sogar die in der Außenluft vorhandenen negativen Ionen durch die Erdung der metallischen Luftleitungen und Komponenten des Lüftungssystems, die aus Kunststoffen bestehen.

4.1 REDUKTION VON VIREN UND UFPS AUS DER RAUMLUFT

In den „Prüfkriterien für mobile Lüftungsreiniger“ beschreibt die VDI EE 4300 Blatt 14 vom 20.7.2021 folgende Lösungen zur Reduktion von UFPs:

- Filtergeräte mit Filterklassen wie HEPA H13 (Anmerkung: regelmäßiger Filtertausch erforderlich, höherer Energieverbrauch)
- Geräte zur Desinfektion von Luft, Wasser und Oberflächen mit UVC-Strahlung (Anmerkung: Gefahr schwerer Augen- und Hautschäden)
- Geräte mit Vireninaktivierung bzw. -abscheidung durch Ionisation bzw. Plasma

Anmerkung zu Varianten von Plasma bzw. Ionisationsanlagen nach Külpmann (2018):

- Ionisation durch NTP-Luftreinigungsgeräte NTP = nichtthermisches Plasma (Anmerkung: Entstehung von Ozon und toxischen Nebenprodukt möglich)
- Ionisation nach dem Prinzip leifähiger Luft® (Anmerkung: optimale Luftionenkonzentration im gesamten Raum, keine Freisetzung von Ozon, Stickoxiden, Elektro-Smog)

4.2 FUNKTIONSPRINZIP EINER RAUMLUFT AKTIVIERUNGSANLAGE

Am Beispiel einer proIO Anlage wird der Systemaufbau einer Raumluft Aktivierungsanlage schematisch dargestellt.

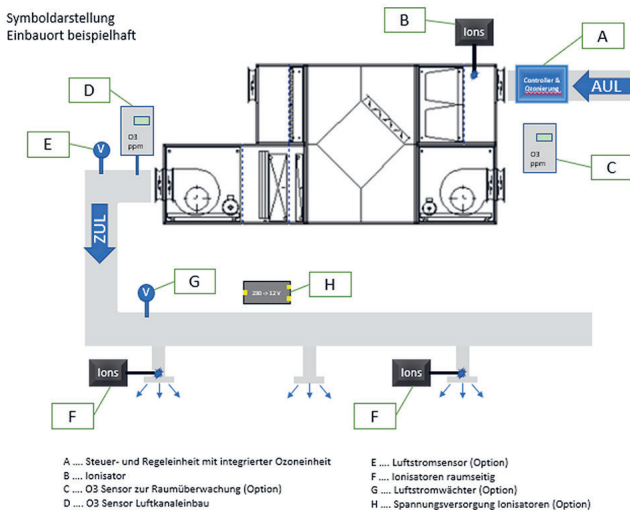


Abb.4: Systemaufbau proIO (Proluft GmbH 2020)

4.3 ENERGIEEINSPARUNG

Die technischen Lösungen zur Reduktion von UFP in der Raumluft ermöglichen auch eine verstärkte Nutzung von Umluft in raumluftechnischen Geräten, wo dies zulässig ist. Damit ließen sich bei hohen (Sommer) und tiefen (Winter) Außentemperaturen große Energieeinsparungspotentiale heben bei gleichzeitig starker Verbesserung der Raumluft gegenüber herkömmlichen Systemen.

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Seit mehr als einem Jahrzehnt haben sich Luftaktivierungsanlagen bewährt. So zum Beispiel wird seit 2006 bei 21 OP-Anlagen im größten Spital der Niederlande (Eindhoven) durch jährliche Kontrollmessungen durch das zuständige Hygieneinstitut die dauerhafte Vorbeugung gegen Aerosolinfektion überprüft. Die Ergebnisse bestätigen, dass keine Keimbelastung und keine Aerosolbelastung in den Räumen vorliegen. (Bolst 2007)

Durch den Einbau eines Systems zur geregelten Aktivierung der Raumluft in eine bestehende oder neue Lüftungsanlage wird Folgendes erreicht:

- Ultrafeinste Partikel (auch Viren) $< 0,3 \mu\text{m}$ werden stabil, dauerhaft und sicher bis zu 98 % aus dem Luftstrom entfernt
- Damit verbunden Reduzierung der Ansteckungsgefahr durch Tröpfcheninfektion in den Räumen
- Abbau der auf Flächen abgelagerten Bakterien und Viren (COVID-19) durch nahezu rückstands-freie Oxidation zu vorrangig CO_2 und H_2O
- Die abgelagerten Partikel werden analog der Natur nahezu rückstandsfrei oxidiert, dabei wird nicht nur das COVID-19 Virus angegriffen, sondern alle oxidierbaren organischen schädlichen Verbindungen – so auch MRSA-Keime, Pilze etc.
- Durch Anreicherung der Raumluft mit natürlichen negativen Ionen werden Leistungssteigerungen beim Menschen erreicht und das menschliche Wohlbefinden und Regenerationsvermögen erhöht.

LITERATUR

- BAFU (2021) Datenabfrage NABEL, Luftbelastung, Bundesamt für Umwelt BAFU Datenabfrage NABEL (admin.ch)
- Bolst D. K. (2007) Langzeitmessung Ionisations- und Ozonanlage zum Abbau von Bakterien, Viren und Aerosolen; Eindhoven, Städt. Krankenhaus/ Catharina Ziekenhuis, Eindhoven, NL; IWK Institut für Wärme-, Klima- & Verfahrenstechnik e.V. Bochum
- Bové H. B. (2019) Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3>
- Braunegg Ch. (2020) unveröffentlichte Dokumentation, ConsultAir GmbH, Wien
- Flory R., Ametepe J., Bowers B. (2010) A randomized, placebo-controlled trial of bright light and high-density negative air ions for treatment of Seasonal Affective Disorder. *Psychiatry Research*, Volume 177, Issues 1–2, 15 May 2010, Pages 101-108, <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2008.08.011>
- Hutter H.-P, Kundi M., Wallner P. (2011) Luftionen in Innenräumen: Einfluss auf Wohlbefinden, Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Institut für Umwelthygiene, Medizinische Universität Wien.
- Khare P., Machesky J., Soto R., Megan He M., Presto A., Gentner D. R. (2020) Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances*; (6) p 1-14. Retrieved from <https://advances.sciencemag.org/content/6/36/eabb9785.full>
- Külpmann R. (2018) Luftionengehalt – Eine Behaglichkeitskenngröße?, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, GG | Nachrichten 11-2018

- Küster E., Dittmar C. (1940) Experimentelle Untersuchungen über therapeutische Beeinflussung von Impf- und Spontantumoren durch Behandlung der Versuchstiere mit unipolar negativ hochionisierter Luft. *Zeitschrift für Krebsforschung* 50: 457–464. <https://doi.org/10.1007/BF01620208>. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF01620208>
- Lehmann J. (2021) unveröffentlichte Messergebnisse 2/2021, Technisches Büro DI Jörg Lehmann, Kesselsdorf bei Dresden
- Lelieveld J. & Klingmüller K., Pozzer A., Pöschl U., Fnais M., Daiber A., Munzel Th. (2019) Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European heart journal*. 40. 1590-1596. 10.1093/eurheartj/ehz135
- Moser M, Auerbach D, Frohmann E, Grote V, Lackner H, Messerschmidt D, Muhry F, Zeiringer C (2004) Wasserfallelektrizität – Wirkung von Luftionen auf die Gesundheit. In: Voigt Beatrice, in Beitrag von Moser Max, Wasser – Schatz der Zukunft. Impulse für eine nachhaltige Wasserkultur. 1, 172; Oekom. Gesellschaft für Ökologie, München.
- PROLUFT GmbH (2020) unveröffentlichte Systemdokumentation, Professionelle Lüftungssysteme Reinigungs-GmbH, Mühlleiten.
- Riediker M., Zink D., Kreyling W. et al. (2019) Particle toxicology and health - where are we? *Part Fibre Toxicol* 16, 19 <https://doi.org/10.1186/s12989-019-0302-8>
- Rönkkö T., Kuuluvainena H., Karjalainen P., Keskinen J. et al. (2017) Traffic is a major source of atmospheric nanocluster aerosol. *PNAS Early Edition*, January (16) Retrieved from www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1700830114
- Teller S., Tahirbegi I., Mir M. et al. (2015) Magnetite-Amyloid- β deteriorates activity and functional organization in an in vitro model for Alzheimer's disease. *Scientific Reports* (5) 17261. <https://doi.org/10.1038/srep17261>
- Umweltbundesamt (2018) Health Effects of Ultrafine Particles. *Umwelt & Gesundheit* 05/2018, Umweltbundesamt, Bundesamt. Retrieved from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba_ufp_health_effects_haupt_final.pdf
- Varga A. & Mersch-Sundermann V.H. (2021) Luftionen – Baubiologisches Glossar, Homepage Baubiologie Streil – Ihr Partner für gesundes Wohnen und Arbeiten in Münschen, Eichendorffstr. 6, 82223 Eichenau b. München, <https://www.baubio-logisch.de/glossar/luftionen/>
- VDI 6022 (2011) Raumluftechnik, Raumlufqualität – Hygieneanforderungen an raumluftechnische Anlagen und Geräte,
- VDI EE 4300 (2021) Prüfkriterien für mobile Lüftungsreiniger, Blatt 14 vom 20.7.2021, <https://www.vdi.de/news/detail/vdi-gibt-tipps-zum-einsatz-von-mobilen-luftreinigern>
- Wu X., Nethery R.C., Sabath B., Braun D., Dominici F. (2020) Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study (Updated April 24, 2020) *medRxiv* 2020.04.05.20054502; doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>
- VDI 6022 Blatt 3 Tabelle 10.2. Raumluftechnik - Raumlufqualität - Beurteilung der Raumlufqualität

KONTAKTDATEN:

Dipl.-HTL-Ing. Christof BRAUNEGG, MBA
c/o ConsultAIR G.m.b.H.
Email: office@consultair.at

Energieeffizienz und Behaglichkeit in sanierten Bildungsbauten – am Fallbeispiel VS Semriach

M. Kendlbacher, A. Koch

IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH, Wien, Austria

ABSTRACT: As part of a KLIEN Mustersanierung, the school building in Semriach was renovated and expanded with a library and an attic extension in summer 2019 by the architects ARCH + MORE ZT GmbH. The building has been thermally renovated made with 8 cm interior insulation and new windows. The existing window ventilation has been substituted by a very efficient mechanical ventilation system.

By these measures, the HWBSK has been reduced from 204 kWh/(m²a) to 21 kWh/(m²a) according to the Austrian energy certification.

After the renovation a monitoring phase of 1.5 years has made it possible to optimize the operations.

The following optimization measures were carried out during the monitoring phase:

- Checking and replacement of heat meters and sensors: This was the basis for operational optimization through monitoring.
- Adjustment of the minimum air volume of the ventilation systems: This has led to a significant reduction in electricity, heat and maintenance requirements.
- Adjustment of the supply air volume: In classrooms with increased CO₂ values, the air quality in the class has been improved through the ventilation system. At the same time, the amount of air in the library has been reduced, thereby improving the humidity.
- Thermostat limitation of the radiators (T_{min} and T_{max}): This has reduced incorrect usage and this led to a reduction of heating by maintaining the same level of comfort.
- Adjustment of mistakes in the control schedule

The monitoring carried out has contributed a lot to the optimization of operations, although it has also shown that it is not possible to fully comply with the energy parameters of the energy certificate.

- Monitoring supports the identification of technical errors and their elimination.
- Monitoring saves operating costs
- Monitoring makes control possible if numbers on paper are not adhered to in practice. This enables a legal obligation to make improvements.
- Monitoring guarantees comfortable educational buildings with healthy and learning-promoting framework conditions for students and teachers.
- Monitoring ensures flexible buildings that respond to changing conditions, such as climate change or pandemic-related school closings or reduced operations.
- Monitoring creates knowledge from which we can learn.

Therefore monitoring is a basic requirement for the development and implementation of sustainable buildings in order to meet national and international climate targets.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen einer KLIEN Mustersanierung wurde das Schulgebäude in Semriach im Sommer 2019 saniert und um eine Bibliothek sowie einen Dachgeschoßausbau mit dem Architekturbüro ARCH + MORE ZT GmbH erweitert (Abb. 1 und Abb. 2).

Bei der Sanierung wurde sehr auf das äußere Erscheinungsbild geachtet und daher folgte neben dem Fenstertausch die Ertüchtigung der Außenwände mit einer 8 cm Innendämmung.

Die bestehende Fensterlüftung wurde durch eine sehr effiziente mechanische Be- und Entlüftungsanlage ersetzt.

Durch die thermische Sanierung und Installation der Lüftungsanlage sowie der gut gedämmten Erweiterungsflächen konnte der HWBSK lt. Energieausweis von 204 kWh/(m²a) auf 21 kWh/(m²a) gesenkt werden.

Nach der Sanierung erfolgt durch ein laufendes Monitoring für 1,5 Jahre eine Betriebsoptimierung.



Abb. 1: Volksschule Semriach vor der Sanierung und Erweiterung (ARCH+MORE ZT GmbH 2021)



Abb. 2: Foto der Volksschule Semriach nach der Sanierung und Erweiterung (volksschule-semriach.at 2021)

2. WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNG

Können Energieeffizienz und Behaglichkeit in Bildungsbauten durch ein technisches Monitoring erhöht werden? Um diese Frage zu beantworten, wurde der Betrieb der Volksschule Semriach im Anschluss an eine umfassende Sanierung und Erweiterung für 1,5 Jahre technisch überwacht, optimiert und wissenschaftlich ausgewertet.

3. PROBLEMSTELLUNG

Zur energetischen Bewertung von Gebäude werden genormte Randbedingungen angesetzt. So sind etwa die Außentemperaturen in jedem Jahr gleich und beziehen sich auf eine Periode zwischen 1981 bis 2000. Bildungsbauten werden beispielsweise 269 Tage im Jahr genutzt, mit einer konstanten Luftwechselrate von 2 h⁻¹ und einer jährlichen Beleuchtungsdauer von 1.800 h. Standardisierungen ermöglichen eine rationale Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude in Österreich. In der Realität verhalten sich jedoch weder das Klima, die Gebäude noch die Bewohner durchgehend nach Norm, sondern variieren und reagieren aufeinander. Gerade unvorhersehbare Ereignisse, wie pandemiebedingte Schulschließungen, ein reduzierter Betrieb oder Temperaturschwankungen wie etwa im April 2021 von mehr als 10 K innerhalb von 24 h legen Schwächen von starren System(-einstellungen) offen. Dies hat zur Folge, dass wertvolle Einsparpotenziale smarter Energiekonzepte nicht in Gänze ausgeschöpft werden.

4. METHODE

Mit unterschiedlichen Messstellen wird genauestens geprüft, wieviel Energie die Volksschule Semriach verbraucht und mit Bedarfsprognosen verglichen.

Das Monitoring beinhaltet ein viertelstündliches Auslesen und Verarbeiten folgender Daten für einen Zeitraum von zwei Jahren:

- Wärmemengenzähler (z. B. Radiatoren, Fußbodenheizung)
- Elektrozähler (z. B. Gesamtstromverbrauch)
- Außenklima (z. B. Außentemperatur)
- Lüftungsanlage (z. B. Zulufttemperatur)
- Raumluftklima (z. B. CO₂-Konzentration)

Die ausgelesenen Daten werden im CSV-Dateiformat gesichert und ausgewertet, um die Lesbarkeit der Ergebnisse plattformübergreifend garantieren zu können. Darüber hinaus erfolgten eine Plausibilitätsprüfung und eine quartalsweise Berichterstellung, um gezielte Maßnahmen zu setzen und so den Betrieb zu optimieren. Dies kann einerseits der Ersatz von Messstellen (bei Defekt) oder andererseits eine Anpassung der Haustechnikeinstellungen sein.

5. ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden einige Ergebnisse aus dem Monitoring vorgestellt.

Die folgenden Diagramme stellen den gemessenen Energieverbrauch für Raumheizung (Abb. 3) und Trinkwarmwasser (Abb. 4) dem normierten Energiebedarf (vor und nach der Sanierung) gegenüber. Die Werte weichen stark voneinander ab. So prognostizieren etwa die berechneten Bedarfswerte für die Raumheizung eine Verringerung des Energiebedarfs im Zuge der Sanierung um circa 75 %. Im Vergleich dazu liegen die Messergebnisse um 30 % über den prognostizierten Werten. In den Schwachlastzeiten stellen sich die Überschreitungen am signifikantesten heraus. Überdies kommt es bis in den

Sommermonaten (Juni) zu Heizungsverlusten. Dies deutet zum einen auf Verteilverluste, zum anderen auf eine fehlerhaft eingestellte Regelung hin.

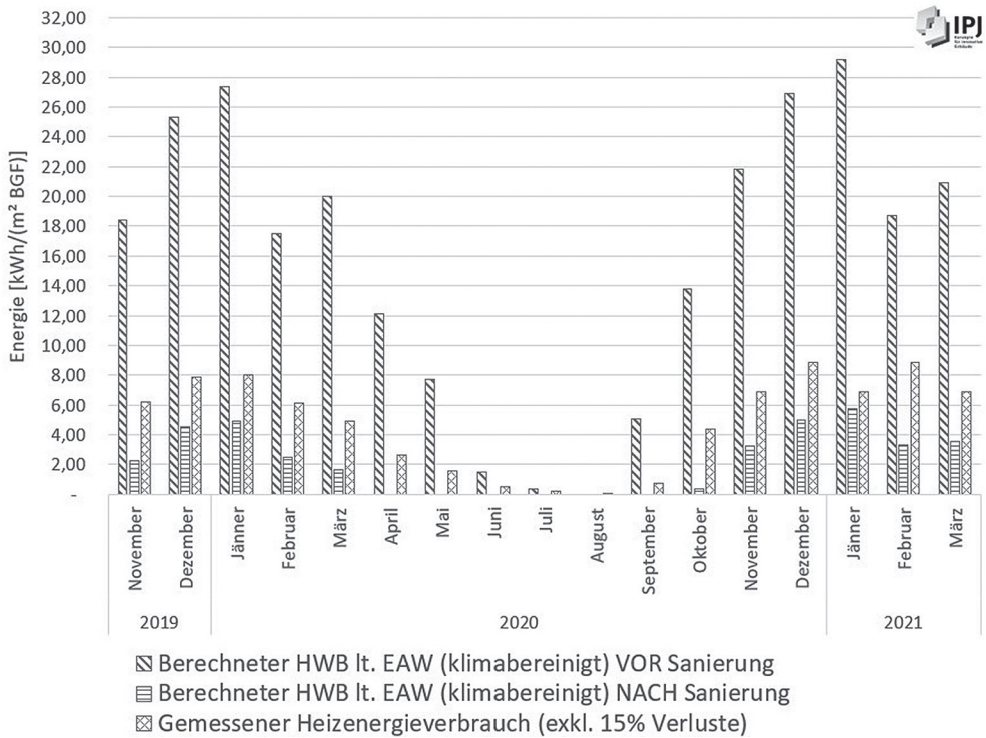


Abb. 3: Monatliche Gegenüberstellung des berechneten Energiebedarfs für Raumheizung lt. EAW vor und nach der Sanierung im Vergleich zum tatsächlich gemessenen Heizenergieverbrauch.

Bei der notwendigen Energie zur Warmwasserbereitung weist die Schule wesentlich geringere Energieverbräuche als die von der OIB-Richtlinie prognostizierten Energiebedarfe auf. Dies könnte zum einen auf den pandemiebedingten reduzierten Schulbetrieb als auch auf eine im Vergleich zur Norm reduzierte Ausstattung der Schule zurückzuführen sein.

Abb. 5 stellt die Ergebnisse der Außenluftmessung und Raumluftmessung am Beispiel eines Musterraums im Dachgeschoss dar. Die Raumlufttemperatur beträgt mindestens 16,3 °C, maximal 32,5 °C und im Durchschnitt 23,9 °C. Anhand der schwankenden CO₂Konzentrationen werden die Ferien sowie die Auswirkungen der Pandemie auf den Schulbetrieb deutlich.

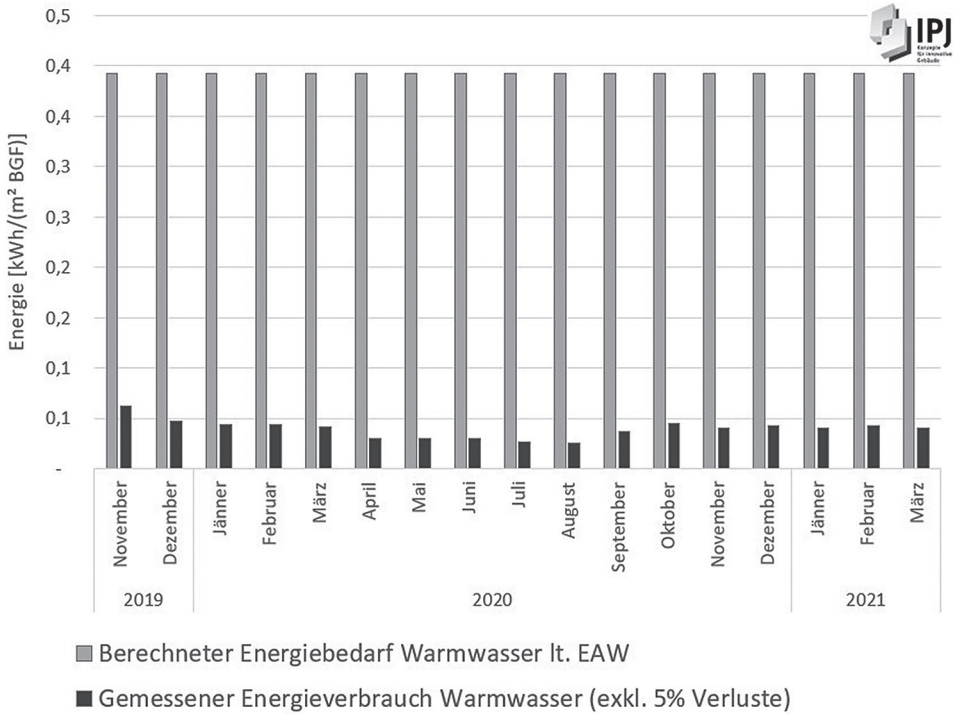


Abb. 4: Gegenüberstellung des berechneten Energiebedarfs für die Trinkwarmwasserbereitung lt. EAW im Vergleich zum tatsächlich gemessenen Energieverbrauch zur Trinkwarmwasserbereitung.

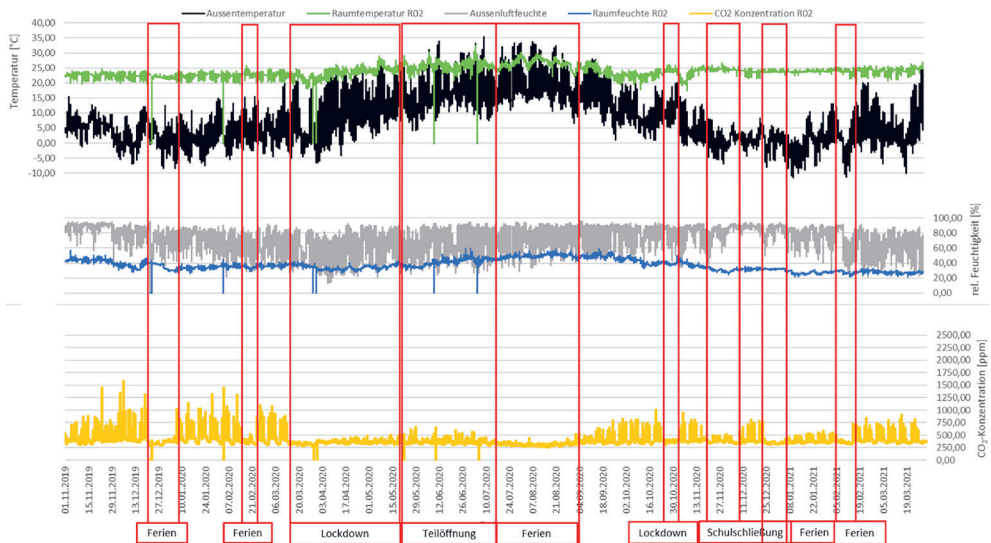


Abb. 5: Raumluftqualität Musterraum DG – 01.11.2019 bis 31.03.2021

Das Diagramm in Abb. 6 verdeutlicht eine Optimierungsmaßnahme hinsichtlich Stromverbrauchs. Am 17. Jänner 2019 wurde die Mindestluftmenge der Lüftungsanlagen von 40 % auf 30 % reduziert und die Betriebsdauer in Abstimmung mit der Schulleitung verkürzt. Damit konnte der Lüftungsstrombedarf um fast die Hälfte des Ausgangswerts gesenkt werden, wobei die Raumluft weiterhin auf einem hohen Qualitätsniveau bleibt.

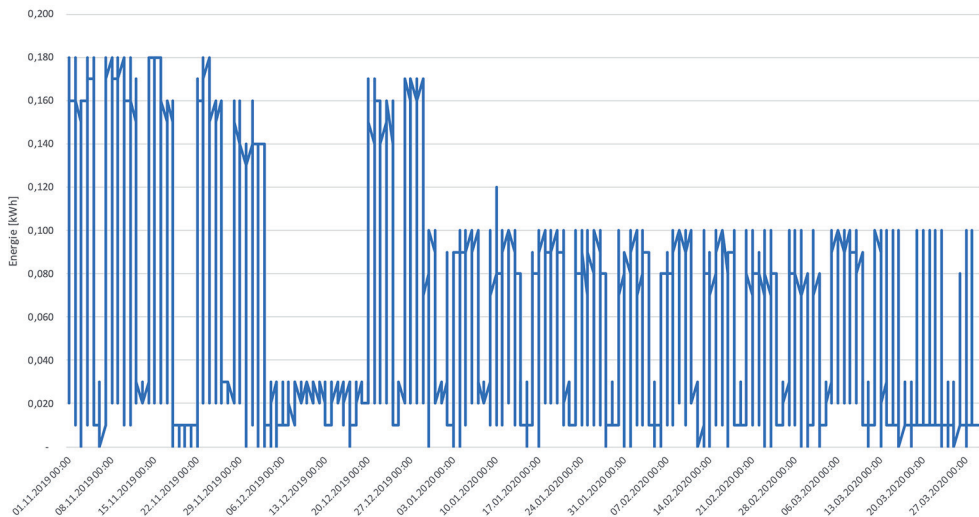


Abb. 6: Stromverbrauch Lüftungsanlage L02

Insgesamt konnten im Zuge des Monitorings folgende Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden:

- Überprüfung und Ersatz von Wärmemengenzählern und Sensoren: Damit wurde die Basis für eine Betriebsoptimierung durch ein Monitoring erst ermöglicht.
- Anpassung der Mindestluftmenge der Lüftungsanlagen: Dies führte zu einer deutlichen Reduktion des Strom-, Wärme- und Wartungsbedarfs.
- Einregulierung der Zuluftmenge: In Räumen mit erhöhten CO_2 -Werten konnte bei gleicher Luftmenge der Lüftungsanlage die Luftqualität in den Klassen verbessert werden. Gleichzeitig wurde in der gering belegten Bibliothek die Luftmenge reduziert und damit die Luftfeuchtigkeit erhöht und damit verbessert.
- Thermostatbegrenzungen der Radiatoren (T_{\min} und T_{\max}): Damit wird zum einen ein fehlerhaftes Verhalten verringert und zum anderen konnte eine Reduktion der Wärmemenge bei gleichbleibendem Komfort erzielt werden.
- Ausbessern von Fehlern in den Kalendern der Steuerung

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Das durchgeführte Monitoring hat viel zur Betriebsoptimierung beigetragen wiewohl es auch verdeutlicht, dass trotz der laufenden Betriebsoptimierung die Energiekennwerte des Energieausweises eingehalten werden konnten.

Monitoring unterstützt beim Identifizieren von technischen Fehlern und deren Behebung.

Monitoring spart Geld, da die Betriebskosten reduziert werden.

Monitoring ermöglicht Kontrolle, wenn Zahlen auf Papier in der Praxis nicht eingehalten werden.

Dies befähigt zu einer gesetzlichen Verpflichtung zur Nachbesserung.

Monitoring garantiert behagliche Bildungsbauten mit gesunden und lernfördernden Rahmenbedingungen für SchülerInnen und LehrerInnen.

Monitoring sorgt für flexible Gebäude, die auf wechselnde Randbedingungen, wie Klimawandel oder pandemiebedingte Schulschließungen oder reduzierten Betrieb reagieren.

Monitoring schafft Wissen, aus dem wir lernen können.

Damit stellt sich **Monitoring als Grundvoraussetzung** zur Entwicklung und Umsetzung zukunftsfähiger Gebäude dar, um nationale sowie internationale Klimaziele zu erfüllen.

LITERATUR

ARCH+MORE ZT GmbH (2021) Mustersanierung Volksschule Semriach, Serviceseite des Klima+energiefonds, Wien

<https://mustersanierung.at/projekte/volksschule-semriach/>

OIB (2015) OIB Richtlinie 6 Energieeinsparung und Wärmeschutz, Österreich: Österreichisches Institut für Bautechnik

ÖNORM (2019) ÖN B 8110-5:2019-03 Wärmeschutz im Hochbau Teil 5 Klimamodell und Nutzungsprofil, Österreich: Austrian Standards International

volksschule-semriach.at (2021) Schulgebäude, Homepage der Volksschule Semriach, <https://volksschule-semriach.at/> abgerufen am 28.9. 2021

KONTAKTDATEN:

IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH

DI Matthias Kendlbacher

Wipplingerstraße 23/3

1010 Wien

Email: kendlbacher@jung-ingenieure.at

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

M. Rabensteiner

4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich

P. Jasek

Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: In the course of the Smart Cities project “Empower Citizens”, the recommendation system “Easy Energy Saver” was developed, which pursues the following goals: (a) active and low-threshold influencing social space and increasing awareness of the energy requirements for heating and cooling as well as their effects on one’s own health; (b) increase in comfort in one’s own home; (c) avoidance of mold growth; (d) reducing the risk of infection; (e) increasing the quality of life in one’s own home; (f) reducing heating costs; (g) reduction of the remaining energy costs if an active cooling device is installed.

Especially in times of COVID-19, we have become aware that there is often no or very poor ventilation. Correct ventilation behavior, however, plays an important role in indoor wellbeing. Without regular air exchange, one becomes tired or one feels uncomfortable, as the CO₂ concentration increases and there is a lack of oxygen in the room air. Other negative factors are moisture that accumulates in the air and possibly viruses and pollutants, for example from furniture or floor coverings. There is also a risk of mold growth and there is no ventilation. Lack of awareness is usually the reason not to ventilate. Although proper ventilation is not complicated, the behaviors must be known. In order to anchor healthy behavior in dealing with this topic in the routine and thereby increase well-being at the same time, some time is necessary. In many cases, however, there is no professional contact person, so that nothing changes in behavior.

“Easy Energy Saver” is a recommendation system that uses visual signals to stimulate ventilation, shading and heating. The system works in a purely passive manner, so that no actuators are addressed directly by the system, but the person ultimately decides for himself whether to carry out the recommendations. According to this principle, the people should slowly learn from the suggested recommendations and after a certain time, be able to use their apartments in an energetically optimal way, considering comfort and health aspects. It is important not to patronize the residents and to take their personal feelings into account in the recommendation system.

Due to the passive mode of operation of the system, it can be made available at low cost (low-cost approach) so that social housing can also be addressed with the project idea. As studies show, poorly situated people in particular are not familiar with the subject of correct ventilation. Accordingly, there is a great need for action here in particular to promote awareness of simply increasing the quality of life.

In the course of the follow-up project “Easy Energy Saver”, the technical and social monitoring activities already started in “Empower Citizens” will be continued. With this follow-up project, the investigation period can be increased to around 1½ years, which considerably increases the informative value of the measurement results. Furthermore, the logic, the visualization and the haptics of the system can be optimized. In addition, a self-learning algorithm is integrated in the system, the control and optimization of which takes a certain amount of time.

1. EINLEITUNG

Der Easy Energy Saver (EES) stellt eine kostengünstige Möglichkeit dar, das Bewusstsein des*der Nutzer*in für intelligentes Lüften, Verschatten und Heizen zu verbessern. Je nach Wahl der Referenzfälle, kann eine Senkung des Heizbedarfs bzw. bei aktiver Kühlung des Kühlbedarfs, erreicht werden.

Die Hauptstation im Inneren der Wohnung empfängt die Wetterdaten des Außensensors und berechnet mithilfe der gemessenen Daten innerhalb der Wohnung die eventuelle Notwendigkeit des manuellen Eingreifens, um durch die Regelung der Temperatur bzw. der Luftqualität (CO₂-Konzentration) und Luftfeuchtigkeit das Wohlbefinden der Bewohner:innen zu verbessern. Der Aufbau des Systems ist in Abb. 1 gezeigt.

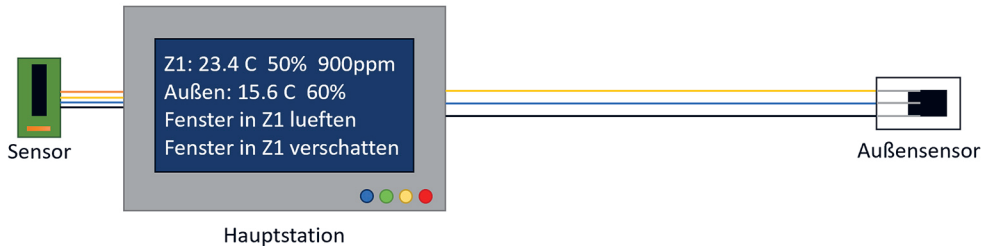


Abb. 1: Ausgabe der Empfehlungen im Versuchszeitraum

Die Beurteilung der Behaglichkeit erfolgt über den sogenannten PMV-Index (Predicted Mean Vote), welcher die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen vorausagt, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Je weiter dieser Wert von 0 abweicht, umso höher ist die Anzahl der unzufriedenen Personen, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Über- oder unterschreitet der aktuelle PMV-Index eine zuvor eingestellte Toleranzgrenze so versucht das System durch die Ausgabe von Empfehlungen die Behaglichkeit für die Personen wieder zu steigern. Diese Behaglichkeitssteigerung kann entweder über Stoßlüften, Verschatten oder aber auch durch das Zurückdrehen der Heizung geschehen. Parallel zu dieser Funktion der Behaglichkeitssteigerung gibt das System auch aus, wann die CO₂-Konzentration in der Zone überschritten wird, und eine Stoßlüftung notwendig ist.

Die Wohnungen werden in verschiedenen Zonen unterteilt, die unabhängig voneinander vom Empfehlungssystem beurteilt werden. Eine Zone ist durch das Vorhandensein einer eigenen Messstation (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂) und der Möglichkeit der Beeinflussung des Raumklimas durch das Verschatten oder das Öffnen von Fenstern oder durch die Regelung eines darin befindlichen wärmeemittierenden Gerätes definiert. In den Wohnungen der Pilotgebäude sind das jeweils zwei Zonen (Schlafzimmer, Wohnzimmer). In Abstimmung mit den Personen wurde aber nur das Wohnzimmer als Zone herangezogen. Die Messsignale aus den einzelnen Zonen werden an eine zentrale Hauptstation in der Wohnung übermittelt. Weiters muss diese zentrale Ausgabestation die aktuelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit von einer Wetterstation erhalten. Zur einfacheren Installation wurde zunächst ein nicht-kabelgebundenes System (zwischen Wetter- und Hauptstation) zur Datenübertragung verwendet.

Nach der Installation des Systems arbeitet dieses noch nicht vorausschauend. Das heißt, dass erst eine Empfehlung ausgegeben wird, wenn eine Toleranzgrenze über- oder unterschritten wird und eine Aktion eine Behaglichkeitssteigerung oder eine Energieeinsparung zur Folge hätte. Die Empfehlungen werden im System folgendermaßen benannt: *recom_vent* (Empfehlung zum Stoßlüften), *recom_shad* (Empfehlung zum Verschatten), *recom_heat* (Empfehlung zum Zurückdrehen der Heizung).

Zur Senkung des Energiebedarfs sind aber auch vorgegebene Empfehlungen sinnvoll, welche vor allem das Verschatten betreffen. Ziel ist es, Empfehlungen dann auszugeben, wenn Personen in der Wohnung sind, und diese motiviert sind diese Empfehlungen auch durchzuführen. Geht jemand beispielsweise täglich um 7 Uhr außer Haus, kann es sinnvoll sein eine Verschattungsempfehlung für einen späteren Zeitpunkt bereits vorgezogen auszugeben, so dass diese Person noch vor dem Verlassen der Wohnung an das Verschatten erinnert wird. Außerdem soll dadurch die Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen minimiert werden. Die Personen dürfen sich keinesfalls von dem System belastet fühlen.

Ist der selbstlernende Algorithmus aktiviert, versucht das System zu erkennen zu welchen Zeitpunkten bevorzugt Befehle angenommen werden. Bei einer Fensterlüftung kann die Detektion relativ einfach durch die CO₂-Konzentration geschehen, sofern die CO₂-Konzentration zwischen der Raum- und der Außenluft zum Zeitpunkt der mutmaßlichen Ausführung ausreichend unterschiedlich war. Ein weiteres Zeichen, ob ein Fenster geöffnet wurde, ist, wenn sich die Zonentemperatur der Außentemperatur anpasst, obwohl die vorherrschenden Parameter ein anderen Temperaturverlauf voraussagen würden. Die als angenommen erkannten Empfehlungen werden gespeichert und sobald genügend Daten vorhanden sind mit einem statistischen Ansatz ausgewertet. Dazu werden die angenommen und die ausgegebenen Empfehlungen abhängig von der Uhrzeit, dem Wochentag und dem vorherrschenden PMV-Index ausgewertet. Werden zu einem Zeitpunkt viele Empfehlungen ausgegeben, aber wenig angenommen, ist das ein Hinweis auf eine häufige Abwesenheit oder Demotivation der Person während dieser Zeit. Werden umgekehrt viele der ausgegebenen Empfehlungen angenommen nimmt das System an, dass die Person zu dieser Zeit häufig zu Hause ist. Unterschiedliche Anwesenheiten an verschiedenen Wochentagen werden ebenfalls berücksichtigt. Darauf basierend kann automatisch ein Anwesenheitsprofil erstellt werden, welches in regelmäßigen Abständen mit neuen Daten upgedatet wird. Neben der Erstellung des Anwesenheitsprofils, versucht das System auch den Komfortbereich der Personen zu erkennen und zu berücksichtigen.

2. VERSUCHSREIHEN

Im Sommer 2020 wurden sieben der EES in verschiedenen Wohnungen installiert. Nur einer davon war auch per Funkmodul mit Antenne mit einer Wetterstation verbunden; die anderen stellen Referenzmessungen für die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration in den Wohnungen dar.

In den Weihnachtsferien 2020 wurden zwei Geräte, die jeweils mit einer eigenen Wetterstation per Funkmodul mit Antenne kommunizierten, verbaut. Während dieses Zeitraumes fiel ein Gerät sehr schnell aus und auch beim zweiten traten Probleme auf. Aufgrund dieser Probleme wurde der EES auf eine kabelgebundene Version umgebaut.

Es wurden schließlich zwei EES mit direkt angeschlossenem Außensensor verbaut. Ein weiterer EES wurde im Büro der 4ward Energy Research GmbH installiert, um zusätzliche Erkenntnisse zu erlangen.

Bei der kabelgebundenen Version des EES war man mit dem Problem konfrontiert, dass einige Bewohner*innen der Kabelverlegung in der Wohnung skeptisch gegenüberstanden. Aus diesem Grund wurde eine vereinfachte Version des EESs entwickelt, indem dieser als CO₂-Ampel ausgeführt wurde. Hierbei werden nur Messungen im Raum durchgeführt, in dem die Ampel installiert ist, und bei Überschreiten der CO₂-Konzentrationsgrenze wird eine Lüftungsempfehlung ausgegeben.

3. AUSWERTUNG DER VERSUCHSREIHEN

In diesem Kapitel werden die einzelnen Versuchsreihen ausgewertet. Es wird so gut es geht die Referenzmessung vom Sommer 2020 als Vergleich herangezogen. Aufgrund der kurzen Versuchsdauer ist aber ein Vergleich nur bedingt möglich. Dieses Problem wurde verschärft, indem es bei der Zeitumstellung (Von Normal- auf Sommerzeit) zu einem Ausfall aller Systeme gekommen ist. Dieser Ausfall wurde erst bei der Entnahme der Messergebnisse bemerkt. Die Versuchsreihen in den Weihnachtsferien konnten aufgrund der kurzen Dauer nicht ausgewertet werden.

3.1 EASY ENERGY SAVER

Am 15. Februar 2021 wurden in zwei Wohnungen vollwertige EES, welche jeweils mit einer eigenen Wetterstation verbunden sind, installiert. Nach den schlechten Erfahrungen der zuvor durchgeführten Messreihe mit einer Funkverbindung, wurden die Wetterstationen mit Kabeln an die jeweilige Hauptstation verbunden.

Der erste EES fiel bereits nach kurzer Zeit aufgrund eines Kurzschlusses bei der Leitung hin zur Wetterstation aus. Der Neustart wurde am 18. März 2021 durchgeführt. Besonders im Bereich, wo es zu dem Kurzschluss kam, wurde besonders auf die Kabelführung geachtet. Kurze Zeit später kam es aber wieder zu einem Ausfall der Wetterstation. Der EES konnte aber ab diesem Zeitpunkt als CO₂-Ampel weiterarbeiten. Aufgrund der geringen Anzahl an Messergebnissen wird auf eine detaillierte Auswertung der Messergebnisse von diesem EES verzichtet.

Der zweite EES lief bis zur Zeitumstellung problemlos. Vor allem in der ersten Phase wurden viele Empfehlungen zur Heizungsregelung ausgegeben. Das beruht auf der Tatsache, dass in dieser Phase der PMV-Index oftmals über der eingestellten Toleranzgrenze von +0,5 lag (siehe Abb. 2). Da die durchschnittliche Tagestemperatur unter der Heizgrenztemperatur von 15°C lag, wurde diese Empfehlung sehr oft ausgegeben. In Gesprächen mit den Bewohnern und Bewohnerinnen kam heraus, dass sich diese aufgrund der langen Signalausgabe Gedanken über deren Raumklima gemacht haben, obwohl sie dieses als angenehm empfunden hatten.

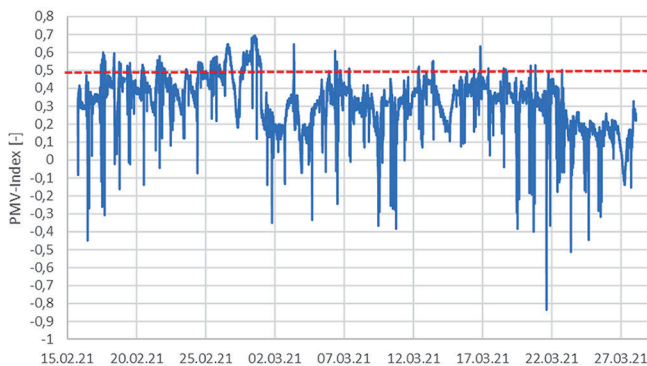


Abb. 2: PMV-Index

In Abb. 3 sind die Ausgaben der Empfehlungen im Versuchszeitraum in summierter Form zu sehen. Wie schon erwähnt, wurden am meisten Empfehlungen zum Rückdrehen der Heizung ausgegeben. Nur einmal wurde eine Empfehlung für das Verschatten ausgegeben. Da die Wohnung nach Süden ausgerichtet ist, wird sich für einen Sommerfall ein komplett anderes Bild zeigen. Hier werden Empfehlungen zum Verschatten vermehrt ausgegeben werden. Die Empfehlung für das Verschatten wird erst ab einer Tagesmitteltemperatur von 15°C aktiviert. Demnach wird zur Senkung der Raumtemperatur entweder die Empfehlung zur Heizungsregelung oder die Empfehlung zum Verschatten ausgegeben, aber nie beide gleichzeitig.

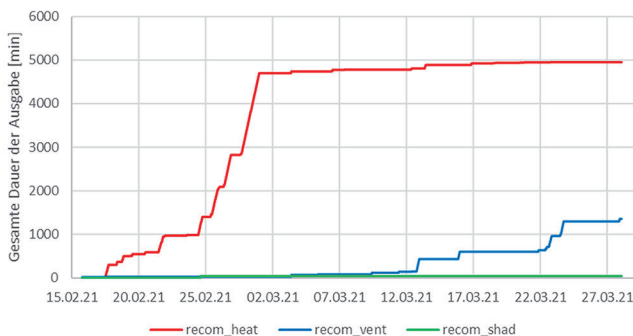


Abb. 3: Summierte Dauer der Empfehlungsausgabe im Versuchszeitraum

In Abb. 4 ist die CO_2 -Konzentration zu sehen. Auffallend ist, dass ähnlich wie bei der konventionellen CO_2 -Ampel (vgl. Kapitel 3.2) fast keine extremen CO_2 -Spitzen mehr auftreten. Im vorliegenden Fall wurde ab einer CO_2 -Konzentration von 1200 ppm eine Lüftungsempfehlung ausgegeben. Anscheinend kommt es auch in diesem Fall zu einer baldigen Empfehlungsannahme. In welchem Maße die Person die Luftqualität selbst als schlecht empfand, oder durch EES darauf aufmerksam gemacht wurde, ist schwer zu ermitteln. Auch ein Vergleich mit der Referenzmessung, welche in dieser Wohnung auch durchgeführt worden ist, ist schwer, da diese im Sommer/Herbst 2020 durchgeführt wurde. Die Referenzmessungen im Herbst 2020 zeigen aber im Mittel etwas höhere CO_2 -Konzentrationen als bei der Versuchsreihe im Frühjahr 2021.

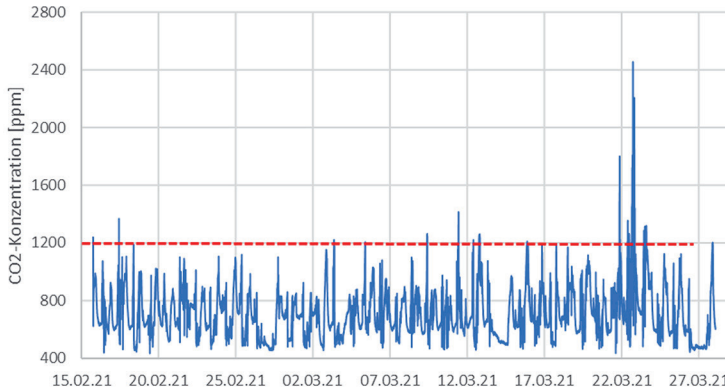


Abb. 4: CO_2 -Konzentration

Die Messungen in den Büroräumlichkeiten der 4ward Energy Research GmbH zeigen ähnliche Ergebnisse. Auf eine detailliertere Beschreibung wird aber verzichtet.

3.2 CO_2 -AMPEL

Am 15. Februar 2021 wurden in zwei Wohnungen CO_2 -Ampeln in Betrieb genommen. Die Parameter wurden so eingestellt, dass eine Lüftungsempfehlung ab 1200 ppm ausgegeben wird. Wenn die CO_2 -Konzentration unter 900 ppm fällt, dann wird die Empfehlung wieder gelöscht. Durch diese Einstellungen konnte ein oftmaliges Wiederholtes Ausgeben von Lüftungsempfehlungen kurz nacheinander verhindert werden.

Aus unerklärlichen Gründen kam es bei einem der Geräte nach kurzer Zeit zu einem Ausfall. Hierbei kam der Nachteil des Offline-Monitorings zum Vorschein. Von außen ist eine Beendigung des Programmes kaum sichtbar. Einziges Indiz in diesem Fall war, dass sich die Messwerte nicht mehr änderten.

Die zweite CO_2 -Ampel war bis in der Nacht der Zeitumstellung in Betrieb. Die Person in dieser Wohnung hat während der Pilotphase immer in den Morgenstunden eine Stoßlüftung durchgeführt. Dabei war die Messstelle etwa 2 Meter vom geöffneten Fenster entfernt. Die Stoßlüftung ist durch ein schlagartiges Absinken der CO_2 -Konzentration eindeutig erkennbar.

Über den Tag wurde nur wenig gelüftet. Trotzdem wurde nur 5-mal eine Empfehlung für das Stoßlüften ausgegeben. Anscheinend wurde auch jedes Mal diese Empfehlung von der Person wahrgenommen und unmittelbar ausgeführt. Durch die Annahme dieser Empfehlungen konnten große CO_2 -Spitzen vermieden werden. Es konnte somit bewiesen werden, dass durch das oftmalige Stoßlüften die durchschnittliche CO_2 -Konzentration in den Zonen gesenkt werden kann. Diese ist damit niedriger als in früheren wissenschaftlichen Arbeiten (Lundqvist & Revsbech 1986; Fehlmann & Wanner 1993).

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Sowohl die Referenzmessung als auch der Betrieb als Easy Energy Saver bzw. als CO₂-Ampel hat gezeigt, dass das System noch nicht für einen sicheren und längeren Betrieb reif ist. Für die Füllung der Matrizen des selbstlernenden Ansatzes, ist ein stetiger Empfang von aktuellen Messwerten notwendig.

Die Verbindung der Wetterstation mit der Hauptstation über Funk, ist sicher am unkompliziertesten in der Installation. Die Wetterstation zeigte in diesem Modus aber einen hohen Strombedarf, so dass der Akku-Pack häufig gewechselt werden musste. Dieser häufige Wechsel konnte den Personen in den Pilotgebäuden nicht zugemutet werden, obwohl in diesem Fall nur eine Wetterstation für mehrere EES notwendig gewesen wäre. Weiters kommt es beim Tausch des Akku-Packs zu einer Unterbrechung der Messwertübertragung, welche länger andauern kann, in Abhängigkeit der Wahrnehmung des leeren Akkustands und der Motivation diesen Akku-Pack auch zu tauschen. Weiters kam es bei der Funkübertragung immer wieder zu unergründlichen Ausfällen, so dass man eine kabelgebundene Version für die Pilotphase wählte.

Durch die kabelgebundene Version ist ein Batterietausch nicht mehr notwendig, da die Wetterstation direkt über die Hauptstation mit Energie versorgt wird. Trotzdem hat die kabelgebundene Version einige Nachteile. Zum einen muss ein starres Telefonkabel in der Wohnung, im Gang, bis hin zu einem passenden Ort einer Wetterstation verlegt werden. Dieser Eingriff in die Privatsphäre in der Pilotphase war herausfordernd. Eine Funkverbindung würde hier von den Personen sicher besser akzeptiert werden, wobei es aber teilweise Bedenken über die „Strahlung“ gab. Durch eine verständliche professionelle Aufklärung konnten diese Bedenken aber beseitigt werden. Am vorteilhaftesten für die Akzeptierung des Gerätes, wäre sicher eine Kopplung per Funk mit einer kommerziellen Wetterstation. Kommerzielle Wetterstationen haben an sich schon eine sehr lange Batterielaufzeit. Ein weiterer Nachteil der kabelgebundenen Version ist, dass für jeden EES eine eigene Wetterstation notwendig ist.

Das vierzeilige Display der Hauptstation ist in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung nur bedingt lesbar. Es wurde bemerkt, dass, wenn LEDs leuchten, dieses Display aufgrund der großen Leuchtstärke der LEDs sogar noch schwerer zum Ablesen ist. Generell hat sich die Empfehlungsausgabe über die LEDs aber bewährt, da diese leicht sichtbar und verständlich ist. Für eine bessere Lesbarkeit müssten aber Display und LEDs besser aufeinander abgestimmt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem Empfehlungen zum Stoßlüften basierend auf einer Überschreitung eines CO₂-Grenzwertes angenommen und ausgeführt werden. Genaue Aussagen inwiefern EES die Raumluftqualität und Behaglichkeit steigert, ist aufgrund der kurzen Messreihen noch nicht möglich. Weiters sind auch noch keine detaillierten Aussagen über die Sinnhaftigkeit des selbständigen Lernens möglich. Es wird an dieser Stelle nur angemerkt, dass in der Versuchsreihe des Frühjahrs 2021, noch keine ausreichend befüllte Anwesenheits-Matrix erzeugt wurde. Damit konnten auch keine Zeitfenster für die vorgezogene Empfehlungsausgabe gebildet werden.

LITERATUR

- Fehlmann J. & Wanner H. (1993) Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. *Indoor Air* 3:41–50.
- Lundqvist G. & Revsbech P. (1986) Ventilation in flats. Measurement of carbon dioxide and air exchange in retrofitted flats. *Ugeskr Laeger* 148:3475–3479.

KONTAKTDATEN:

Dr. techn. DI Markus Rabensteiner
Reininghausstraße 13A
8020 Graz
Email: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

Session 6c

Life Cycle Thinking

A “life cycle thinking” approach to assess differences in the energy use of SiC vs. Si power semiconductors

Díaz Triana / ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH / AT
Schmidt, Glaser / TU Wien / AT
Makoschitz / AIT / AT

Environmental Assessment of Ecodesign Measures for Silicon Based Photovoltaic Modules

Dobra / Montanuniversität Leoben / AT
Oreski / PCCL – Polymer Competence Center Leoben GmbH / AT
Figl / IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH / AT

Knowledge sharing & Organizational Learning shape SMEs’ attitudes towards a circular economy

Baldwin / FH Burgenland GmbH / AT

A “life cycle thinking” approach to assess differences in the energy use of SiC vs. Si power semiconductors

A. Díaz

ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH, Vienna, Austria

S. Schmidt, S. Glaser

TU Wien Vienna University of Technology, Engineering design and product development, Vienna, Austria

M. Makoschitz

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Austria

ABSTRACT: Wide Band Gap (WBG) semiconductors have the potential to provide significant improvements in energy efficiency over conventional Silicon (Si) semiconductors. While the potential for energy efficiency gains is widely researched, the relation to the energy use during manufacturing processes remains insufficiently studied. This question is especially relevant for Silicon carbide (SiC) semiconductors, as there are some key differences in their production processes compared to Si. Through expert interviews and literature research, this paper aims to identify the main differences of the SiC semiconductors production chain. These differences are set off against a typical end-use scenario, to better understand the proportionality of energy inputs vs. efficiency gains. Furthermore, the most important variables in this assessment are highlighted.

1. INTRODUCTION

The broader application of WBG semiconductors for power electronics carries the promise of large energy savings in a range of different applications. Some of the sectors with the highest expected energy efficiency gains enabled by WBG semiconductors are photovoltaic systems (inverters), consumer electronics (power supplies), data centers (uninterrupted power supplies), and the electric automotive sector (drive-trains and charging infrastructure) (Makoschitz et al. 2020). While these energy efficiency improvements from using WBG components compared to Si-components are widely researched and often promoted by manufacturers, the environmental impacts along the entire life cycle (beyond the use phase) are far less understood. Moreover, to the best knowledge of the authors, there is currently no Life Cycle Assessment (LCA) data available specifically focusing on WBG semiconductors, related research is generally scarce, and (publicly) available LCA information of sufficient level of detail and quality is limited or outdated. Most of the current LCA research available in the field of semiconductors focuses on Si-based semiconductors, especially logic and other IC chips (Wernet et al. 2016)). These references mostly contain aggregated data, which does not allow for separate analysis of individual processes and of their materials and energy inputs and outputs.

From a life cycle thinking perspective two aspects seem highly relevant. First, ICs like semiconductor memories, processors or logic chips are highly **energy intensive** to manufacture due to their complex design. Often manufacturing requires hundreds of processing steps. Secondly, the industry is changing and innovating rapidly, and therefore it is also especially competitive and secretive. ICs are subject of a continuous process of miniaturization- also called “die shrink”. Boyd states that this is leading to a *continuous shift of relevance from the manufacturing stage to the use phase* (Boyd 2012).

These aspects do not fully apply to **power** semiconductors, such as metal oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) and diodes, as they are relatively less complex to produce, and are also less affected by the same continuous process of miniaturization. Taking on from these preliminary considerations, the next section discussed the specific assessment methodology and scope developed in this study. The key words to keep in mind are “relevance” and “differences”.

2. METHODOLOGY AND SCOPE

Available studies report that the electricity use in manufacturing is, after the use phase, the most important source of environmental impacts for Silicon based semiconductors (Williams et al. 2002; Yao et al. 2004). The approach of this paper is therefore to gain a better understanding of the differences in the energy demand (i.e., primarily electricity) along the whole life cycle for selected WBG power semiconductors.

This analysis started off by focusing on the two currently most widespread WBG semiconductor materials - Gallium nitride (GaN or Si/GaN) and Silicon carbide (SiC). However, initial research revealed that the detailed assessment of energy use and energy savings along the life cycle is particularly relevant for SiC semiconductors.

The methodology of this study is structured along the life cycle stages and the scope was set on understanding which **processes and/or life cycle stages were (most) relevant**, in two ways: (1) stages that are most important *in terms of their energy inputs*, and (2) stages where *significant differences exist between Si and SiC technologies*. This was achieved through literature review and by conducting targeted interviews with academic and industry experts; who are mostly contributors to IEA 4E PECTA - PECTA is the Power Electronic Conversion Technology Annex of the IEA Energy Efficient End-Use Equipment Program (4E). Its goal is gathering and analysing information on new WBG power electronic devices to inform policy makers (PECTA, 2021a). Interviewed experts helped identify, verify and quantify key selected variables related to processes and their differences (PECTA AAG/IAG 2021b, interview). Fig. 1 shows an overview of the life cycle stages for SiC and Si-based power semiconductors in the scope of this study. A photovoltaic (PV) inverter was the end use application chosen for this paper given the relevant energy savings potential reported for the SiC-based (PV) inverters (Makoschitz et al. 2020).

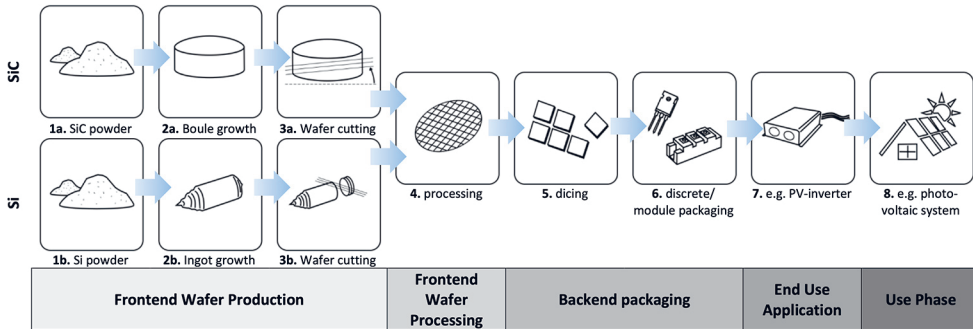


Fig. 1: Life cycle stages of Si and SiC power semiconductors (Graphic: Schmidt and Glaser 2021).

3. RESULTS - DIFFERENCES ALONG THE LIFE CYCLE

The insights and results are discussed next for the processes and stages in Fig. 1. It is important to mention that processes that are similar for both, Si and SiC, might have a substantial share of the overall energy demands. Still, the End of life stage of the electronic devices with SiC and Si is very similar at this point, and as such is not further investigated.

Front-End Wafer production: Si and most GaN semiconductors are manufactured using high purity industrial grade Silicon, by growing **Si ingots** through the Czochalski process (Fig. 1, 1b and 2b), with typical diameters of 8 to 12 inches (200 mm and 300 mm) (Prakash et al. 2011).

The substrate material for SiC semiconductors is also based on silica sand, with additional processing steps needed to obtain the SiC powder (Fig. 1, step 1a). Usually, the Acheson process using physical

vapor transport method (PVT) is applied. In this method, a graphite crucible is heated by induction coils to over 2300 K in a furnace filled with a mixture of silica sand and carbon powder (Yang et al. 2018). The resulting SiC is ground into SiC powder and used as input material for **growing a “SiC boule”** (Fig. 1, 2a). The Acheson process is estimated to require 7700 kWh electrical energy per ton of input material (Tanaka 2011); while the estimate for grinding is 1500 kWh/ton of SiC powder.

The input mass of SiC powder for growing a 6 inch (6”) diameter SiC boule (usable height of 25 mm) is about 30 kg; with a powder density of approx. 1,6 g/cm³. The estimated (embedded) energy of the input SiC powder is **280 kWh/boule** (Fig. 1, 1a) (PECTA AAG/IAG 2021b, interview).

In this study the reference is the production of 6” wafers. Taking the boule height of 25 mm, with a growth rate of 0,2 mm/h, and a power rating of 130 kW (Ellefsen et al. 2019) for the growth process, the resulting energy demand is **16250 kWh/boule**. The growth of the boules (Fig. 1, 2a) with its associated electricity demand, is one of the key performance indicators for the semiconductor’s energy profile.

As indicated before, reliable data regarding the energy demand for growing Si ingots was not available for this study (Most LCA data contain aggregated process data). It was therefore estimated that the energy demand is **20 to 40 times** higher per usable wafer area for growing SiC boules than for growing Si ingots (PECTA AAG/IAG 2021b, interview).

In each case, the ingot and the boule are then cut into wafers (Fig. 1, 3a and 3b), which are polished and prepared for further processing. Compared to Si ingots, SiC boules are much harder to cut into wafers (Armstrong et al. 2017). The process is also accompanied by significant “**kerf losses**”, which are currently estimated to **range between 50 % to 75 %** (PECTA AAG/IAG 2021b, interview). These are significantly higher losses than those from cutting Si ingots into wafers. Assuming low kerf losses of 50 %, for a usable height of 25 mm and 500 µm wafer thickness after cutting would result in 25 wafers/per boule. Taking 100 kWh for the operation of the slicing equipment (1kW*100hr/boule), the resulting energy demand is **665 kWh/6” unpolished SiC wafer**.

Prakash et al. (2011) provide a specific estimate for the energy input for Si wafer production, with an electricity demand of 2127 kWh/kg of polished Si wafer. Converting this energy input estimation of the 6” Si wafer to calculate an equivalent 6” SiC wafer (from a 128 g weight; and 8” wafer), and further assuming mass losses of 40 % (due to polishing from a thickness of 500 µm to 300 µm), this results in an energy demand of **92k Wh/6” equivalent unpolished Si wafer**; for a ratio of 1:7,22 (**92 kWh [Si]: 665 kWh [SiC]**). As the assumptions behind the datasets are not fully known, and the datasets are possibly outdated, the results for Si wafers shall be used with caution.

Front-end wafer processing: “Wafer processing” (Fig. 1, step 4) strongly depends on the complexity of the final chip. ICs like semiconductor memories, processors or logic chips are at the end of the complexity spectrum, often requiring hundreds of wafer processing steps, with a range of different high purity chemicals applied to create layers or so called “**mask levels**”. Power semiconductors such as MOSFETs and diodes require far fewer mask levels compared to memories, processors or logic chips, e.g. SiC IGBTs (insulated-gate bipolar transistors) require about 11 to 12 mask levels (PECTA AAG/IAG 2021b, interview).

Moreover, experts interviewed indicated that SiC wafer processing steps are very similar to Si wafer processing steps; therefore, these steps were not the focus of further investigation. However, one important difference is the processing yield. The yield is still lower for SiC wafers (due to crystal defects or process errors) than for the more established Si wafer front-end processing. The expert estimations for the overall front-end yield is **75 % for SiC, and 90 % for Si** (PECTA AAG/IAG 2021b, interview).

Back-end packaging: The back-end packaging processes follows the front-end processing and typically take place at a different manufacturing location. The dies on the processed wafer are cut into individual chips (Fig. 1, step 5) and enclosed inside a protective package with external leads or connectors (Fig. 1, step 6). There are about 20 families of different types of packages. The packaging type and the number of external leads are the most relevant variables for estimating the energy use of the back-end packaging process (Villard et al. 2015).

Due to the standardization of semiconductor packaging, the adoption of new packaging types is a slow process, which also depends on the device's prevalence. As SiC devices are not yet widely common, they are usually packaged in the same types of packages as Si based devices. With SiC dies often being comparatively smaller than Si dies, using the same packaging type results in an overuse of packaging materials (PECTA AAG/IAG 2021b, interview). Until new packaging standards are developed, it is plausible to consider the energy input for the back-end packaging process to be roughly the same for SiC as for Si semiconductors.

End-Use Application: The packaged chips or modules are incorporated into different end-use applications, e.g., in photovoltaic inverters (Fig. 1, step 7). Key features of WBG devices play an important role. The higher switching frequencies and the lower energy conversion losses allow the design of compact and light weight end products with WBG semiconductors, consequently also using less materials. In the case of industrial transformers and power supplies with SiC, the **overall product size is reduced in the range of 25 % to 50 %** compared to equivalent Si applications (PECTA AAG/IAG 2021b, interview). Certainly, the extent and relevance of this effect depends on the end-use application, and must be investigated at product level to understand how they translate into energy impacts. This will be further investigated in PECTA in the near future.

Use phase: This is the last life cycle stage covered in this study (Fig. 1, step 8). Many studies have quantified the energy efficiency gains enabled by the introduction of WBG semiconductors, gains which vary widely depending on the end-use application. (Warren et al. 2015) estimate an average energy efficiency improvement of 14,7 % due to the introduction of SiC semiconductors in the automotive industry (hybrid electric vehicles), resulting from improvements at the inverter level, but also from overall system improvements. For (PV) inverters, average energy **efficiency gains** of 2% are estimated (Makoschitz et al. 2020). As established Si based inverters already have a high efficiency in the order of 96,8 %, further improvements seem rather limited.

In Austria PV systems have typically (approx.) 1000 hours of full load per year (use intensity). Assuming 20 years of service (product life time), the efficiency gains, namely the energy saved (not used) for a 1 MW (industry scale) PV system with a WBG inverter **would be approx. 20000 kWh/year, reaching up to 400000 kWh savings over its entire life cycle**. This example shows that the use of a WBG application could “pay back” many times the energy input needed for its manufacturing, through the higher efficiency and intense use over a long service life. In another scenario, the energy efficiency gains for power supplies in consumer electronics e.g., laptops, tablets and smartphones, range between 3 % to 9 % (Makoschitz et al. 2020).

KEY VARIABLES OF THE ENERGY PROFILE

The **five** most important aspects and variables for assessing the energy profiles and its differences between SiC and Si power semiconductors are discussed as follows:

- (1) **Boule growth:** The growth of SiC boules requires significantly more energy per usable wafer area due the energy intensive processes, the smaller wafer diameters, and a significantly smaller usable height (thickness).
- (2) **Process yields:** A number of losses influence the energy “burden” of the die at the end of the production line, notably the material losses for the growth of the boule (and ingot), the kerf losses from wafer cutting, and the processing losses due to faulty dies.
- (3) **Die size ratio:** WBG power semiconductors are able to fulfil the same function with a smaller die. As growing the SiC boule is the most energy intensive step in the manufacturing, the die size ratio is key for assessing its energy profile.
- (4) **Effects on the product design:** Using WBG semiconductors allowing higher switching frequency might have a strong impact on product design, enabling for example a reduction of material use, size and weight in selected end-use applications.
- (5) **Use phase characteristics:** it is plausible to state that the Use phase of SiC power semiconductors will be the stage that plays the most important role, as shown with the (PV) inverter example. Key variables in this case are the energy efficiency gains, the use intensity, and the product's lifetime.

In summary, while the aspects 1 and 2 will negatively impact the energy profile of SiC devices (i.e., higher energy demand); the variables and aspects 3, 4 and 5 are those where SiC devices will show substantial improvements and savings.

4. DISCUSSION

As LCA data for WBG semiconductors was not readily available for this study, the aim was to describe the life cycle stages, the related processes and most relevant variables, especially for assessing their energy inputs. This study presented estimates of the energy inputs for four manufacturing steps (including sub-processes) of SiC and Si based devices, and discussed the differences in each case as well as their magnitude in relation to the potential for energy savings, taking as example a (SiC based) PV inverter as end-use application. The front-end processing and back-end packaging processes are very similar for both SiC and Si semiconductors. The front-end wafer production shows though more differences in terms of energy use, due to the nature of materials and the maturity of the processes involved (i.e., level of process losses). Further exploring the impacts on the design and on energy improvements resulting from incorporating SiC in certain end-use applications remains an area of research interest.

In terms of the life cycle thinking perspective presented in this study, future work aims at gaining a deeper understanding of the contribution to the life cycle stages that showed more differences between technologies as well as higher impact, to identify effective levers for improvement - a difficult task in light of the sparse LCA data available. Taking as references other relevant (LCA) impacts already identified for Si based semiconductors, i.e., global warming potential, abiotic resources depletion, water eutrophication, raw water use, human eco-toxicity, and photochemical (Summer) smog (Villard et al. 2015); the focus could also be expanded to assess these (LCA) impact categories for SiC semiconductors. Finally, research on the energy and environmental impacts of GaN based semiconductors will be pertinent, as these mature and penetrate the market.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the Austrian Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, as part of the IEA Energy Efficient End-Use Equipment (4E) technology program: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/technologieprogramme/4e/iea-4e-tcp-pecta.php>. Our gratitude goes to the PECTA experts interviewed, for their invaluable insights and data for this study. The views and information presented in this paper are the sole responsibility of the authors, and do not reflect the views or opinions of PECTA, 4E or the IEA.

REFERENCES

- Armstrong K., Das S., Marilino L., (2017) Wide Bandgap Semiconductor Opportunities in Power Electronics, US Dept. of Energy. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub104869.pdf>
- Boyd S. (2012) Life-Cycle Assessment of Semiconductors (1. Aufl.). Springer New York, New York, NY, Online-Ressource.
- Ellefsen O.M., Arzig M., Steiner J., Wellmann P., Runde P. (2019) Optimization of the SiC Powder Source Material for Improved Process Conditions During PVT Growth of SiC Boules. Materials (Basel, Switzerland), 12 (19), 3272.
- Makoschitz M., Krischan K., Bergmann P., Díaz Triana A., Brueninger R. (2020) Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map. 4E PECTA (2021a) https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2020/05/PECTA_Report_Total-V10final-May-2020.pdf.
- PECTA AAG/IAG - Academic and Industrial Advisory Groups, (2021b). Expert Interviews on WBG semiconductors and Si based semiconductors. Interview, 2021.

- PECTA (2021a) Power Electronic Conversion Technology Annex, <https://www.iea-4e.org/pecta>
- Prakash S., Schischke K., Stobbe L. (2011) Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik. Ressourcenschonung im Aktionsfeld IKT, unpublished.
- Tanaka H. (2011) Silicon carbide powder and sintered materials. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 119 (1387), 218–233.
- Villard A., Lelah A., Brissaud D. (2015) Drawing a chip environmental profile. *Journal of Cleaner Production*, 86, 98–109.
- Warren JA., Riddle ME., Graziano DJ., Das S., Upadhyayula VKK., Masanet E., Cresko J. (2015) Energy Impacts of Wide Band Gap Semiconductors in U.S. Light-Duty Electric Vehicle Fleet. *Env. Science & Technology*, 49 (17), 10294–10302.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B. (2016) The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (9), 1218–1230.
- Williams E.D., Ayres R.U., Heller M. (2002) The 1.7 kilogram microchip: energy and material use in the production of semiconductor devices. *Env. Science & Technology*, 36 (24), 5504–5510.
- Yang C., Liu G., Chen C., Hou Y., Xu M., Zhang Y. (2018) Numerical Simulation of Temperature Fields in a Three-Dimensional SiC Crystal Growth Furnace with Axisymmetric and Spiral Coils. *Applied Sciences*, 8 (5), 705.
- Yao M.A., Wildson A.R., Mcmanus T.J., Shadman F. (2004) IEEE Int. Symposium on Electronics & the Environment. 10-13 May, 2004, Scottsdale, AZ, USA. IEEE, Piscataway, N.J., 328 p.

CONTACT INFORMATION:

Dr. Adriana Díaz Triana
Schwindgasse 4/2; 1040 Vienna
Email: diaz@ecodesign-company.com

Environmental Assessment of Ecodesign Measures for Silicon Based Photovoltaic Modules

T. Dobra

Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

G.Oreski

PCCL – Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Österreich

H. Figl

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Photovoltaics (PV) play a crucial role in the transition towards a renewable energy supply and are generally seen as a “green” energy technology. However, sustainability topics (e.g. ecodesign but also end-of-life (EOL) management) have gathered widespread attention in the PV industry only recently, with past improvements being driven by economic and not environmental motives. Ecodesign measures offer the potential to further reduce the environmental impact of PV (electricity). However, holistic assessments are needed in order to enable fair comparisons and reliable conclusions. Four different module architectures (one standard and three based on ecodesign principles) have been assessed in this work. As only minimal data for the EOL phase was available, it could not be included in the quantitative assessment but was taken into account qualitatively. Results show that the ecodesigned module architectures have a lowered environmental impact, with the main driver being the improvement of use phase parameters (prolonged lifetime & lowered degradation). The decrease of impacts during the production phase, enabled by material reduction and substitution, only contributes to a relatively small extent for the considered cases. In regard to the EOL management, no substantial differences are observed for the current situation, although the ecodesigned modules can offer advantages once more specialised recycling technologies are established in the future.

1. INTRODUCTION

Global photovoltaic (PV) capacity has surpassed 750 GW in 2020 (REN21 2021), becoming an increasingly important cornerstone for a sustainable energy supply. Several different module technologies are available (e.g., CdTe, CIGS) but silicon-based panels (c-Si) have by far the highest market share at the moment and will continue to be in that position for the foreseeable future. Therefore, they are the focus of this work. In the past the PV industry has implemented several measures (e.g., thinner cells, lowered silver content, increased module efficiency) for economic reasons, which have also (somewhat unintentionally) led to a reduced environmental footprint of modules and the electricity generated by them (Weckend et al. 2016). In recent years more attention has been given to the issue of sustainability in the PV industry concerning areas like module repair and reuse, end of life (EOL) management (incl. recycling) and also ecodesign.

This work aims to show how different ecodesign options and module architectures affect the environmental performance of c-Si PV modules and the produced electricity. The EOL phase is usually omitted from quantitative assessments of PV systems due to a lack of sufficient reliable data. In order to counteract this problem, an additional goal of this work is to implement a complementary qualitative assessment of this life cycle stage.

2. MATERIALS & METHODS

2.1 MATERIALS

Four different module architectures are compared in this work. These include a standard module found on the market today (std) and three ecodesigned modules:

- eco1: based on commercially available alternatives
- eco2: based (partially) on alternatives currently under development
- ego-g: glass/glass architecture with commercially available alternatives

Details about the material composition of each module can be found in Tab. 1. Frame and junction box are not included in the list as no changes were implemented for these components.

Tab. 1: Material composition of the four considered module architectures

Module	std	eco1	eco2	eco-g
Front Glass	3.2 mm (with Sb)	3.2 mm (Sb-free)	2 mm (Sb-free)	2 mm (Sb-free)
Front Encapsulant	EVA	PE	PE	PE
Cell	standard	ROHS-certified	ROHS-certified	ROHS-certified
Inter-connection	Cu with SnPb	Cu with SnBi	Cu with SnBi	Cu with SnBi
Back Encapsulant	EVA	PE	combined back-sheet and encapsulant (PE/PP)	PE
Backlayer	TP backsheet	PP backsheet		2 mm glass

2.2 QUANTITATIVE ASSESSMENT

The quantitative assessment was performed in accordance with the general principles of Life Cycle Assessment (LCA) based on ISO 14040/14044. Life Cycle Impacts (LCI) were calculated with the help of GaBi software, data from ecoinvent 3.6. and using the CML methodology (Version 2016). In this paper, only the results for the Global Warming Potential (GWP) are presented. The focus for the module production phase (incl. upstream processes) was on identifying the differences in LCI for the considered module architectures. An up-to-date data set (provided by industry confidentially) for a module adhering to the material composition for the std-module was used as the basis for the subsequent modelling. Final results were calculated in the form of [impact/kWh] by relating the LCI of a module to its Lifetime Energy Production (LEP). The LEP can be determined by Formula 1 based on (nominal) module power (P), regional energy yield (RE), module lifetime (t) and yearly degradation (d).

$$LEP = P * RE * t * (100 - (0,5 * t * d)) \quad (1)$$

However, due to the limitations described below, the results presented in 3.1.1 should be seen as a first estimation rather than a complete (and final) assessment:

- Due to a lack of data the changes for the cell and interconnections could not be integrated into the upstream processes for module production.

- Only outdated data was available in some areas.
- EOL-phase is not included due to a lack of reliable data.
- Values for degradation and lifetime of the eco-designed modules are based on expert estimations but are not proven by actual long-term evaluations.

For the sensitivity analysis (3.1.2) the aforementioned industry data set was used as a basis for determining the relative impact of varying the different model parameters.

2.3 QUALITATIVE ASSESSMENT (EOL PHASE)

As the EOL phase is not included in the quantitative assessment, a qualitative method based on an updated but not yet publicly available of (Figl et al. 2019) was implemented. Firstly, the separability of the components is assessed – both current industrial processes as well as methods still under development that might be used in the future are considered. For this step, the following classification is used:

- A++: easy separability, clean fractions, no (structural) damage
- A+: clean fractions, slight (structural) damage
- A: clean fractions, (structural) damage
- B: no clean separation of fractions

Secondly, the obtained fractions (from the separation process) are categorised and graded according to their EOL pathway (see Fig. 1) based on currently available technologies.

Grade	1	2	3	4	5	6	
	Reuse or Closed Loop	Recovery			Disposal		
Categories	RU CL	Recycling		Other Recovery	Landfilling		
		RC+ CL with effort	RC- RC+ with effort	OR	Landfill class 0+I+II	Landfill class III+IV	
			Incineration				
			EV+	EV-	EB+	EB-	

Fig. 1: EOL categories based on an updated version of Figl et al. (2019)

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 QUANTITATIVE ASSESSMENT

3.1.1 Comparison of module architectures

The results in regard to GWP are shown in Tab. 2 below. For all ecodesigned module architectures, a reduction in the range of 6 – 7 gCO₂-eq. (= 17.5 - 20,5 %) can be observed.

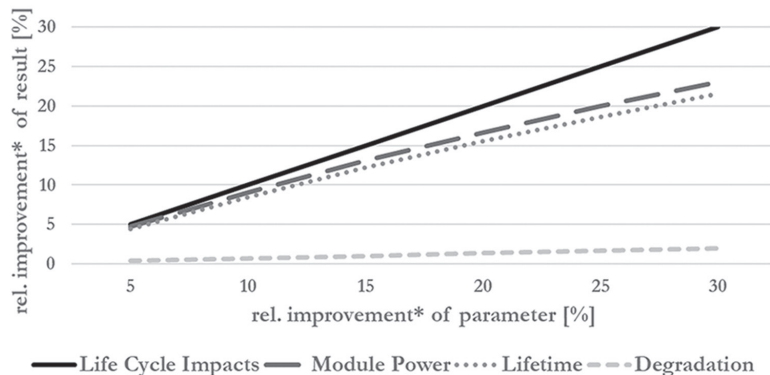
Tab. 2: GWP per kWh for different module architectures

Module Type	LCI kg CO ₂ -eq.	P. Wp	RE kWh/(kWp*a)	t a	d %	GWP g CO ₂ -eq./kWh
std	230	300	1,000	25	0.5	32.71
eco1	227	300	1,000	30	0.4	26.83
eco2	220	300	1,000	30	0.4	26.00
eco-g	230	300	1,000	30	0.35	26.97

This improved environmental performance is mainly caused by the enhanced use phase parameters (longer lifetime, lower degradation). The changes in LCI because of the alternate materials used during the production phase only make up a small amount of the benefits. Even in the case of the eco2 module, which has the highest reduction in regard to the LCI, only 21 % of the total improvement is caused by this factor. This can be explained by the fact that the production of the cells (incl. upstream processes) and the frame make up most (> 80 % for GWP) of the environmental impacts of PV modules (Hong et al. 2016; Stoppato 2008) and no changes were implemented for these components in the calculation.

3.1.2 Relevance of model parameters

Fig. 2 shows the correlation between the parameters used for calculating the GWP and the final result. The parameter “Regional Energy Yield” is not considered as it is not influenced by design but rather the location of module installation. A change of the LCI correlates directly with the results because this parameter represents the numerator in the calculation formula. An LCI decrease of 10 % leads to an equivalent reduction of 10 % for the GWP. Increases in module power and lifetime lead to slightly fewer improvements in regard to the result (9.09 % and 8.48 % GWP reduction respectively for 10 % parameter increase) but still offer a substantial improvement potential. The difference compared to the LCI value is explained by the fact that these parameters are in the denominator of the calculation formula. Furthermore, the effect of prolonging the lifetime is diminished to a small extent by the degradation, as a module produces less energy per year in its latter life stages. Finally, the lowering of degradation offers only a small improvement potential (10 % decrease leads to 0.66 % GWP reduction).



* Improvement in Fig. 2 refers to lowering regarding LCI, degradation as well as the result (GWP) and to increase regarding module power and lifetime respectively.

Fig. 2: Relation between model parameters and GWP result

3.2 QUALITATIVE ASSESSMENT

3.2.1 Separability of materials

Tab. 3 shows an overview regarding the compatibility of the considered module architectures with different separation technologies. The following separation technologies were considered, whereby only number 1 is currently implanted on an industrial scale and all other processes are still under development:

- Disintegration of the laminate by shredding – e.g. (Wambach et al. 2017)
- Mechanical layer-by-layer removal (e.g. grinding) – e.g. (Palitzsch 2019)
- Removal of polymers through a thermal process – e.g. (Park et al. 2016)
- Removal/destabilisation of encapsulant by solvent – e.g. (Doi et al. 2001)
- High-intensity/low-energy light pulses – (Flaxres n.d.)

Tab. 3: Compatibility of modules with different separation technologies

Separation technology	std	eco1	eco2	eco-g
(1) mechanical – class B	yes	yes	yes	yes
(2) mechanical – class A	yes	yes	yes	no
(3) thermal – class A+	yes*	yes	yes	yes
(4) chemical – class A+	no	yes*	yes*	yes*
(5) physiochemical – class A+	yes	?	?	?

* with limitations

No significant differences exist for the considered module architectures for the current industrial separation technology, as it is possible to use shredding without any limitations. Mechanical layer-by-layer removal is not feasible for the ego-g module as a glass sheet is used as the outer layer on both sides, which is not (easily) removable compared to the usually used polymer backsheet. In principle, all module architectures can be separated by a thermal process. However, limitations for the std module need to be kept in mind due to the fluorine-containing backsheet and the related emissions. The dissolution of EVA in order to separate the laminate has proven not to be possible under industrially feasible conditions. The picture is not as clear for polyolefin-based encapsulants where improved solubility has been observed (Feldbacher et al. 2021), although no definite conclusion on the industrial implementation potential has been reached. Finally, new processes like the physiochemical separation have usually been only tested for modules using standard configurations. Therefore, no clear assessment is possible for all other module architectures.

3.2.2 Recovery potential

For the recovery potential, two scenarios regarding the preceding separation have been considered. Firstly (Fig. 3) only a separation of the frame, cables, glass and ribbons takes place. The polymers along with the cells remain as a mixed fraction, which is treated thermally – this represents the current industrial practice. Although a glass fraction is separated, the contamination is too high for usage as a secondary resource in flat or PV glass production. Therefore, the material has to be “downcycled” and is used for the production of insulation material (foam glass). In the second case (Fig. 4) it is assumed that all components are separated and can be processed separately. Differences between the std module and the others can be observed for the polymers, where PE/PP can be recycled (although the application for heavily aged polymers is still unclear) while EVA and fluoropolymers do

not have recycling pathways available, and the glass fraction where the Sb-content in std glass limits the use in the float glass industry. The use as a secondary resource for PV glass production is technically possible.

Current	std	eco1	eco2	eco-g
Frame	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)
Cables	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)
Glass	4 (OR)	4 (OR)	4 (OR)	4 (OR)
Ribbons	2 (RC+)	2 (RC+)	2 (RC+)	2 (RC+)
Cells*	5 (EB+)	4/5 (EV-/EB+)	4/5 (EV-/EB+)	4/5 (EV-/EB+)
Encapsulant*	5 (EB+)	4/5 (EV-/EB+)	4/5 (EV-/EB+)	4/5 (EV-/EB+)
Backsheet*	5 (EB+)	4/5 (EV-/EB+)	4/5 (EV-/EB+)	n.a.

* Mixed fraction. Assumptions: lower heating value > 11 MJ/kg (for all), bulk density > 200 kg/m³ (for all), halogens 1 – 10 % (for std), mineral fraction > 15 % (for all)

Fig. 3: Recovery potential considering current separation scenario

Future	std	eco1	eco2	eco-g
Frame	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)
Cables	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)	1 (CL)
Glass	1/4 (CL/OR)	1/2 (CL/RC+)	1/2 (CL/RC+)	1/2 (CL/RC+)
Ribbons	2 (RC+)	2 (RC+)	2 (RC+)	2 (RC+)
Cells	3 (RC-)	3 (RC-)	3 (RC-)	3 (RC-)
Encapsulant	3 (EV+)	2/3 (RC+/EV+)	2/3 (RC+/EV+)	2/3 (RC+/EV+)
Backsheet	5 (EB+)	2/3 (RC+/EV+)	2/3 (RC+/EV+)	n.a.

Fig. 4: Recovery potential considering future separation scenario

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

The performed assessments show that ecodesign measures can be applied to PV modules in order to reduce the environmental impact of the produced electricity. The implementation of the ecodesigned module architectures analysed in this work reduces the impact during production (albeit to a rather small extent) while also offering the chance of increased Lifetime Energy Production by reduced degradation and prolonged lifetime. Additional (technical) evaluations in this regard should, however, be performed in order to evaluate whether the expected improvements can be achieved and subsequently correctly quantified under real-life conditions.

In general, the reduction of impacts during the life cycle of a module has the most direct effect on the impact per kWh, with the production phase offering the most improvement potential. Measures in this regard (e.g., material reduction/substitution but also a change of production location) should

therefore be considered as a primary adjustment area. Prolonged lifetime and increased module power have also been identified as significant parameters in order to reduce the environmental impact of PV electricity. Ideally, certain module architectures can improve all these mentioned parameters at the same time.

Finally, while no significant advantages in the current recycling system can be seen for the ecodesigned module architectures, the potential for higher recovery rates and improved secondary resource qualities is identified for future scenarios when more specific recycling processes are established. Integration of the EOL phase in the quantitative assessment would be desirable in order to enable a holistic approach. Therefore, more concrete EOL data – regarding energy use, emissions, etc. – should be collected along with the development of technical solutions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and performed within the Austrian “Energy Research Program” project “PVRe² - Sustainable Photovoltaics”.

REFERENCES

- Doi T., Tsuda I., Unagida H., Murata A., Sakuta K., Kurokawa K. (2001) Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67 (1-4), S. 397–403.
- Feldbacher S., Dobra T., Mühlbacher I., Oreski G., Aarnio-Winterhof M. (2021) Solubility of Solar Encapsulants – Improvement of Recycling Processes. EU PVSEC 2021. WIP GmbH & Co Planungs-KG, 09.09.2021.
- Figl H., Thurner C., Dolezal F., Schneider-Marin P., Nemeth I. (2019) A new Evaluation Method for the End-of-life Phase of Buildings. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 225, S. 12024.
- Flaxres (n.d.) A new benchmark in recycling photovoltaics. Online verfügbar unter <https://www.flaxres.com/>.
- Hong J., Chen W., Qi C., Ye L., Xu C. (2016) Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. In: *Solar Energy* 133 (5), S. 283–293.
- Palitzsch W. (2019) Recycling von PV-Modulen. *Moderne Kreislaufwirtschaft – Notwendigkeit und Potenzial*. PV Recycling Workshop. Vienna, 05.03.2019.
- Park J., Kim W., Cho N., Lee H., Park N. (2016) An eco-friendly method for re-claimed silicon wafers from a photovoltaic module. From separation to cell fabrication. In: *Green Chem.* 18 (6), S. 1706–1714.
- REN21 (2021) *Renewables 2021 Global Status Report*. Paris.
- Stoppato A. (2008) Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. In: *Energy* 33 (2), S. 224–232.
- Wambach K., Heath G., Libby C. (2017) *Life Cycle Inventory of Current Photo-voltaic Module Recycling Processes in Europe*. Report IEA-PVPS T12-12:2017.
- Weckend S., Wade A., Heath G. (2016) *End-of-Life management: solar photovoltaic panels*. IEA-PVPS Report Number: T12-06:2016.

KONTAKTDATEN:

Tudor Dobra
Franz Josef-Straße 18
8700 Leoben
Email: tudor.dobra@unileoben.ac.at

Knowledge sharing & Organizational Learning shape SMEs' attitudes towards a circular economy

A. Baldwin

University of Applied Sciences Burgenland, Eisenstadt, Austria

ABSTRACT: SMEs, as main stakeholder in the triple helix academia-industry-government, are central stakeholders in the knowledge-based economy. As such they stand to gain competitive advantages from accessing up-to-date research results and being aware of good-practice in knowledge sharing and dissemination. The paper in hand attempts to identify processes and methods that improve knowledge sharing between academia and industry in the context of using this exchange to promote principles of the circular economy (CE): It does so by looking at how knowledge management and knowledge sharing affect predictors of organizational learning (OL) and consequently shape SMEs' attitudes towards a CE and its underlying business models. This literature review looks at knowledge sharing (KS) frameworks supporting OL both for academics who research the circular economy and its underlying business models and practitioners who manage sustainable SMEs who wish to integrate economically viable principles of the circular economy in their business practices. This paper is limited to identifying knowledge sharing enabling processes and frameworks in heavily knowledge-based environments and can serve as basis for further analysis of other business areas or industrial sectors.

Keywords: circular economy, knowledge-based economy, SMEs, organizational learning, knowledge management

1. INTRODUCTION

To date KM issues surrounding the spread of CE principles among SMEs have received little attention. This is in part due to the fact that the circular economy is a rather recent and evolving phenomenon that responds to an environmental crisis caused by side effects of the traditional line economy in terms of global resource management. And it is also due to the fact that the principles of how value is created and defined in a CE context with focus on sustainability differs to value creation in the traditional line economy.

The triple helix academia-industry-government is a framework within which we assess economic activity and change patterns. It can be used to examine the degree to which innovation has become systemic. Innovation and innovation system patterns are subject to permanent change as the system in which they operate are also in constant flux due to the evolving integrating and differentiating forces (Leydesdorff et al. 2006; Leydesdorff et al. 2012).

This mechanism hold especially true in a knowledge-based economy. While it is rooted in the traditional line economy, the knowledge-based economy can be viewed as a framework and enabler for the overall transition from a linear to a circular economy. Knowledge-based economy, the economy of a 'knowledge society', relies on knowledge as a fundamental economic resource – a resource that is quite unlike any other resource we base economic activity on. Knowledge is a constantly growing resource rather than one the can be depleted. The OECD, the Organization for Economic Cooperation and Development defines knowledge-based economy as “directly based on the production, distribution, and use of knowledge and information” (OECD 1996). This type of economy is valued according to economic indicators such as “creation and diffusion of knowledge”. It regards knowledge-based transactions as the main sources of growth and wealth creation. Zhang and Gao (2011) note that “In the society of knowledge-based economy, economic development depends increasingly on the intellectual

capitalization...university regards knowledge innovation and social development acceleration as its social missions...As an independent and equal main body, the university, industry, and government act as the elements of innovation” (Zhang and Gao 2011, p.61).

Leydesdorff (2006) also argues that a knowledge-based economy — as opposed to a traditional, political economy — results from the development of an industry-oriented economy towards one that institutionalizes science and technology and focuses on knowledge as a good that yields a competitive edge. Therefore, knowledge sharing between the three agents of the triple helix is recognized as a key driving force of the economy and its continuous development, notably its development from a line economy toward a circular economy (CE) (Cramer 2020), thus a sustainable economy.

The economic paradigm, as described by Sillanpää et al. (2019), that is driven by the exploitation of natural resources for the production of consumer goods that are destined to end in landfills has come under criticism and spurs the onset of a counter-movement – the circular economy, where value is no longer created through producing and consuming as extensively as possible. CE has made its way into public awareness as a ‘reliable alternative economic concept able to cope with the imminent global sustainability issues, created by the current unidirectional economic model, Linear Economy (LE)’ (Sillanpää 2019, p.1).

Our economic reality is such that traditional business models still prevail. They focus on the bottom line – regardless of whether the business sells a product or service. Generating profit is an acceptable measure of business success. The legal and economic framework in which business operates in Austria today is designed to cater to linear economy principles, and the main challenge of the economy in transition is the move away from conventional measures of success and to find and define new criteria according to which businesses operate and are valued. Innovation hubs, incubators, funded projects and start-up centers act as knowledge sharing frameworks promote new approaches to doing business and support “*Organizations looking to operate in a sustainable manner*”...*that aim to harmonize economic, social, and environmental outputs and outcomes and look at enabling a value creation that preserves and enhances financial, environmental, social, and human capital*” (Scipioni et al., 2021).

In a world in which value creation through extensive production and consumption is no longer viable, the transition to an alternative, sustainable circular economy, has begun to gain momentum. Proponents of CE are designing and realizing sustainable production-consumption systems. Policymakers, scientists, and business people acknowledge CE as the alternative economic model to generate economic growth while solving global sustainable development issues and creating closed loops for value recovery.

Organizational learning capabilities have been identified as important factor for the acquisition, creation, storage, sharing and application of knowledge. Kordab et al. (2020) even outline the relationship between organizational learning and sustainable organizational performance. Organizational learning is a social process that involves the integration of new personal, professional and social competencies into one’s own professional reality and can be promoted and sustained by management processes that promote individual development within the framework of an organization’s strategy. Such learning can be positively enforced through transformational leadership, which emphasizes sense making and intellectual stimulation in teamwork and fosters collaborative relations among employees across all levels of an organization’s hierarchy (Begum et al. 2020).

SMEs and academic researchers are important stakeholders of the economy and stand to gain competitive advantages from accessing to up-to-date research results. “*Research on SMEs has shown that they are becoming increasingly aware of the benefits of improving resource efficiency even though... they do not often link them well to the concept of a circular economy. Saving material costs, creating competitive advantages, and new markets are among the main reasons for European SMEs to take action*” (Rizos et al. 2016). In their efforts to take action towards more sustainable business models, SMEs are often adversely affected by poor knowledge sharing frameworks established between academia and practitioners (Cramer 2020; Demestichas et al., 2020; Gera 2012; Ghenta et al. 2018).

The European Union has responded to this evolution in its ‘Strategic Innovation Agenda (SIA) 2021-2027 (<https://eit.europa.eu/news-events/news/eit-strategy-2021-2027-agreed>) and dedicates research funds to innovation capacity building with the aim of setting up knowledge and innovation communities throughout the region and founding a pan-European innovation ecosystem.

Researchers have spotted a gap between the quality of research results and their impact on the economy, especially on SMEs and on organizational decision-making processes. The paper in hand tries to identify good practice processes and methods that promote knowledge sharing between academia and industry with the aim of making principles of the circular economy more widely known and asks how knowledge management and knowledge sharing affects predictors of organizational learning (OL) (e.g. team structures, shared vision, innovative powers) and thus shapes SMEs’ attitudes towards a CE and its underlying business models.

2. LITERATURE REVIEW

Cantù et al. (2021) list five external categories for both barriers and enablers of organizational change: (1) user behaviour, (2) regulatory bodies, (3) infrastructure, (4) economic aspects in existing markets, and (5) supply chain issues. They also identified organisation-based barriers and enablers on the way to a more sustainable and circular economy: (6) knowledge, (7) a company’s finances, (8) organizational structures and (9) characteristics related to a company’s product.

It can be argued, that in an economy in transition from a line economy to as sustainable circular economy, knowledge management (KM) and knowledge sharing (KT) frameworks such as innovation hubs, incubators, funded projects, and start-up centers support organizational learning (OL). They can act as drives and enablers of change because they can have an impact on user behaviour (mainstreaming more eco-friendly and sustainable behaviour), regulatory bodies (grass roots movements for better implementation of legal frameworks, fight against corruption, awareness programs for sustainability), infrastructure (establishing tech support and promoting waste management systems) existing markets (balancing competition for market shares and resources), and supply chains (increasing trust between partners, establishing collaborative processes).

Studies cited by Begum et al. (2020) suggest that OL plays a decisive role in organizational outcomes and effectiveness and that an organization’s readiness to learn correlates with an organization’s ability to adapt to new market conditions. These findings are expected to hold true for academics who research the circular economy and its underlying business models and practitioners who manage sustainable SMEs and who wish to integrate economically viable principles of the circular economy in their business practices. Rizo et al. (2016) specifically look at the challenges SMEs face and mention the close relation between the SMEs’ managers attitude towards the CE, risk aversion on the part of the managers, cost-benefits assessments and general resistance to change as some key barriers to adopting CE-principles. They further cite a lack of government support, lack of capital and *“lack of information about the benefits of the circular economy”* (Rizos et al. 2016, p. 4) as barriers to introducing circular business models.

Thus, promoting principles of a CE through knowledge management, and organisational learning could support SMEs on their quest for improved sustainability. Communication and dissemination practices referenced to the SECI-knowledge conversion model (Nonaka & Konna 1998; Nonaka 2001; Nonaka & Takeuchi 2012) designed to impact organizational learning between academics and practitioners find their practical application in innovation hubs, incubators, funded projects and start-up centers, why such frameworks merit particular attention. *“Specifically in Europe, CE is regulated via a top-down approach, with governments aligning or creating regional conditions that encourage the proliferation of CE initiatives across the country. In contrast, emerging economies are often characterized by corruption, the absence of strong legislation, and low monitoring and regulation compliance”* (Cantù et al. 2021, p.3).

When it comes to enablers for transformation, Rizos et al. (2016) found that company culture and the attitudes of managers and staff are the prime enablers for working with circular approaches. Here,

knowledge sharing (KS) frameworks such as innovation hubs, incubators, funded projects, and start-up centers can have a major impact in how young entrepreneurs decide to do business. *“SMEs state that the mindset and commitment of the staff is an important aspect to ease the transition to a circular economy model. It is mentioned that for newly founded start-up companies it is relatively easy to adopt circular economy principles, as their company culture develops from scratch, which can be easier than changing practices in existing firms”* (Rizos et al. 2016, p.11).

Cantú et al. (2021) furthermore looked at SME’s learning from failure and success when implementing CE principles. In their article, they point out how the lack of institutionalized support promotes more bottom-up initiatives. In particular, they describe how bottom-up strategies for implementing processes that encourage a circular economy were spurred by a relative lack of resources. In particular, they refer to a framework named ReSOLVE, which *“takes the core principles of circularity and transforms them into six implementation action areas: Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize, and Exchange”* (Cantú et al. 2021, p.3). In this example, the above-mentioned triple helix model comes to mind: a weak administration does not simply hamper economic evolution: the balance and characteristics of integrating and differentiating forces shifts, not their existence.

Responsible research & innovation (RRI) is a concept that emerged from the discourse on ethics in research and innovation. In 2012, Rene von Schomberg first defined responsible innovation as *“a transparent, interactive process by which societal actors and innovators become mutually responsive to each other with a view to the (ethical) acceptability, sustainability and societal desirability of the innovation process and its marketable products”* (von Schomberg 2012). Whilst von Schomberg’s work was inspired by ethical considerations, it can be applied to research and innovation in the social sciences as well. At a point in time where global resources become scant, the question of how we can use them should be elevated to a question of utmost importance in regard to economic behaviour of humankind. According to Auer & Jarmai (2017), RRI tries to reconcile economic growth, competitive advantage, and the well-being of society. It is complementary to the sustainability movement in that it looks to unite societal well-being and innovative progress and views social and environmental considerations as source for economic success and new entrepreneurial activity and thus looks at promoting *socially responsible research and innovation*.

This is where knowledge sharing between academia and the industry faces new challenges. Traditionally, academia and the industry ascribe to a different purpose, a purpose that clearly delineates their respective functions as two distinct triple helix stakeholders. While researchers focus on creating and disseminating research findings, often with limited access to or consideration of practitioners, the latter consecrate few resources to learn about, adopt and utilize current findings. While the paradigm shift from the linear to the circular economy is already well on the way in research & development, putting the principles of the circular economy into practice lags behind due to practical, economic and regulatory issues associated with enabling change in existing structures. Higher education institutes have a lot of catching up to do when it comes to organizing research that is closer to the economic realities of SMEs. And SMEs suffer from a lack of information regarding alternative approaches to engaging in business. Rizos et al (2016, p.4) cite a survey *“of 300 European firms conducted by the FUSION EU co-funded project that showed that most firms had either never heard of the term ‘circular economy’, or could not understand its meaning. On the positive side, when participants were given a simpler definition of circular economy, involving aspects such as the re-use and recovery of waste materials, the majority responded that they were actually already making efforts to recycle and repair. Companies also identified waste management as a sector that could unlock new business opportunities”*.

To improve collaboration between academics and practitioners, KT enablers, good practice examples and skills to tackle barriers in academia-industry relations promote SMEs’ familiarity with circular economy principles. It puts business decision makers in a position to make more informed decisions when it comes to engaging in practices related to the circular economy. Such activity incites socio-economic innovation and change, furthers economic growth and contributes to companies’ competitiveness. Such innovation often grows out of the production, dissemination and utilization of

knowledge. This knowledge is a commodity that is often rooted in the research activities carried out at institutions of higher education. Both the industry and the higher education institution thus stand to gain from professionalizing their collaboration and exchange on the way to establishing a sustainable, circular economy.

Kaufmann et al. (2006), point out that the mission, the technological field of activity, the resources and geographic location impact knowledge sharing between academia and the industry. They - like Rizos et al. (2016) – agree that organizational structure and management style are key components to a successful knowledge exchange ecosystem. Kaufmann et al. also list the size of R&D in the respective organizations, market structures and research performance need to be taken into account when analyzing a knowledge sharing framework.

Thus, it is conducive to knowledge sharing between academia and the industry to establish knowledge spaces in which the stakeholders can collaborate and foster the development towards a CE. Since communication plays a major role in successful knowledge sharing, ways need to be found to communicate knowledge in such a way that research findings are readily accessible and adoptable by SMEs. Knowledge accessibility becomes part of a knowledge creation and conversion process.

3. CONCLUSIONS

The long-term impact of knowledge sharing (KS) frameworks such as innovation hubs, incubators, funded projects, and start-up centers on the overall economy in terms of change agents in a transition towards more sustainability and even towards a full-fledged circular economy (CE) remain to be analysed. Research suggests that the extent to which KS frameworks such as innovation hubs, incubators, funded projects, and start-up centers enable newly founded companies to embrace sustainable or circular business models, but long-term effects need to be monitored.

The figures below are taken from Rizos et al. (2016, p.11), who analysed 52 business case studies that were published on the GreenEcoNet platform. Of the 52 case studies, 30 offered information regarding circular economy activities. The figures clearly show that company culture is the main driver for change. They also show, that networking and network-related support are of importance. This may be related to the fact that start-ups adopt principles of a circular economy more readily that established companies, because they grow out of a start-up ecosystem in which flat hierarchies, collaboration and networking are highly valued. Whether or not the importance of these aspects is related to certain industries remains to be seen.

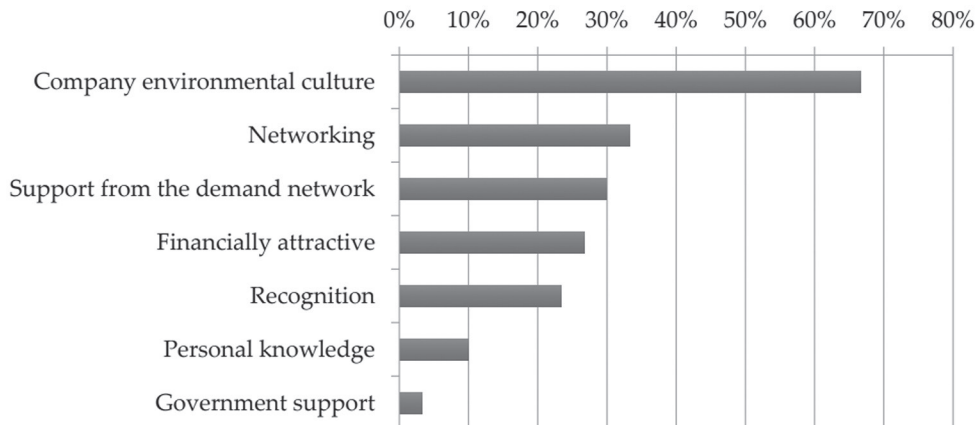


Fig. 1: Percentage of SMEs mentioning enablers for circular economy principles (taken from Rizos et al. 2016, p. 11)

The information regarding enablers for circular business activity can be compared to the perceived barriers in the very same study. The figure below indicates the obstacles for introducing principles of circular economy, as mentioned in the SME case studies published on the GreenEcoNet platform and analysed in Rizos' sample:

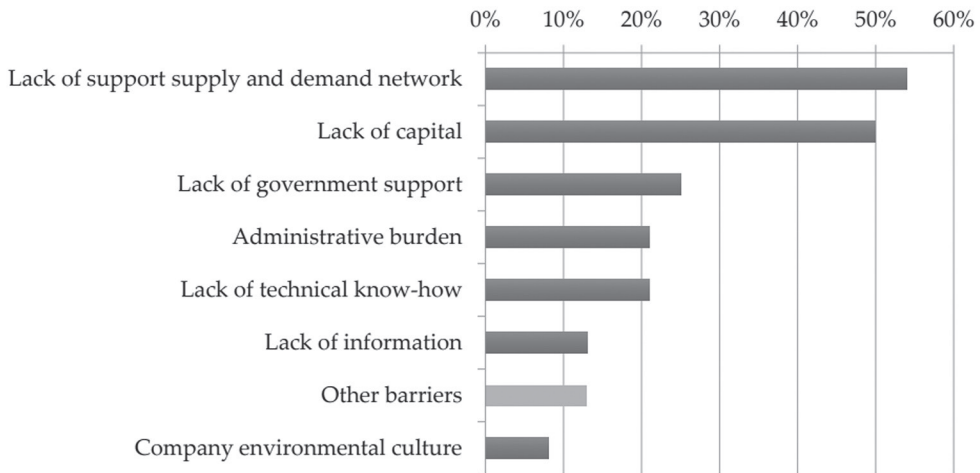


Fig. 2: Percentage of SMEs mentioning barriers for circular economy principles (taken from Rizos et al. 2016, p. 11)

Additionally, one of the core issues surrounding the transition from a linear to a sustainable circular economy is rarely touched upon: consumer behaviour. Many efforts to transform widely accepted economic practice focus on integrative approaches rather than disruptive approaches. At the core, there is a heavy emphasis on consumption as motor and as gauge for economic performance in developed and developing societies alike. One core challenge – consumer behaviour – is rarely addressed. The majority of research focuses on economic transition and transformation rather than a larger transition and transformation in society.

In his work “Sustainability: A History”, Caradonna estimates that “*the practices inspired by the concept of sustainability could give rise to the world’s third major socio-economic transformation, after the Agricultural Revolution...and the Industrial Revolution.*” He goes on to describe sustainability as ‘*a corrective, a counterbalance*’ to the ‘*unsustainable ecological assault on the planet that was triggered 250 years ago with the onset of industrialization*’ (Caradonna 2014, p.3).

It can be argued that the transition from the agricultural society to the industrialized society was accompanied by major sociological transformations. The roles of people in the system have changed and thus allowed and carried the economic transformation. The industrial revolution revolutionized more than just the way people earned a living, it revolutionized the way people live. It transformed the economy, administration and education.

With this in mind, one should probe the role of innovation hubs, incubators, funded projects and start-up centers in the currently ongoing socio-economic transformation and question what role they play in it and how they can contribute to an all-encompassing, possibly disruptive and measurable change.

REFERENCES

- Auer A. & Jarmai K. (2017) Implementing Responsible Research and Innovation Practices in SMEs: Insights into Drivers and Barriers from the Austrian Medical Device Sector. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 10(2), 17. doi:10.3390/su10010017
- Begum S., Xia E., Mehmood K., Iftikhar Y. & Li Y. (2020) The Impact of CEOs’ Transformational Leadership on Sustainable Organizational Innovation in SMEs: A Three-Wave Mediating Role of Organizational Learning and Psychological Empowerment. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 12(8620), 8620. doi:10.3390/su12208620
- Cantú A., Aguiñaga E. & Scheel C. (2021) Learning from Failure and Success: The Challenges for Circular Economy Implementation in SMEs in an Emerging Economy. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 13(3), 1529. doi:10.3390/su13031529
- Caradonna J. L. (2014) *Sustainability: A History*. Oxford: Oxford University Press, Incorporated.
- Cramer J. M. (2020) The Function of Transition Brokers in the Regional Governance of Implementing Circular Economy—A Comparative Case Study of Six Dutch Regions. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 12(12), 5015. doi:10.3390/su12125015
- Demestichas K. & Daskalakis E. (2020) Information and Communication Technology Solutions for the Circular Economy. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 12(18), 7272
- Gera R. (2012) Bridging the gap in knowledge sharing between academia and practitioners. *International Journal of Educational Management*, 26(3), 252-273. doi:10.1108/09513541211213336
- Ghenta M., Matei A. & National Scientific Research Institute for Labour and Social Protection, (INCS-MPS). (2018) SMEs and the Circular Economy: From Policy to Difficulties Encountered During Implementation. *Amfiteatru Economic*, 20(48), 294-309. doi:10.24818/EA/2018/48/294
- Kaufmann H, Vignali C., Orange G. & Heinzl J. (2006) Higher education knowledge sharing and at the Stimulation of economic growth. *International Journal of Management Cases.*, 9 (1), 13-22.
- Kordab M., Raudeliūnienė J. & Meidutė-Kavaliauskienė I. (2020) Mediating Role of Knowledge Management in the Relationship between Organizational Learning and Sustainable Organizational Performance. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 12(10061), 10061. doi:10.3390/su122310061
- Leydesdorff L. (2012) The triple helix, quadruple helix, ..., and an N-tuple of helices: explanatory models for analyzing the knowledge-based economy? *Journal of the Knowledge Economy*, 3(1), 25-35. doi:10.1007/s13132-011-0049-4
- Leydesdorff L. (2006) “While a Storm is Raging on the Open Sea”: Regional Development in a Knowledge-based Economy. *The Journal of Technology Transfer*, 31(1), 189-203. doi:10.1007/s10961-005-5030-6
- Nonaka I. (2001) *Managing industrial knowledge: creation, transfer and utilization* (1. publ. ed.). London [u.a.]: SAGE Publ.
- Nonaka I. & Konno N. (1998) The Concept of “Ba”: Building a Foundation for Knowledge Creation. *California Management Review*, 40(3), 40-54. doi:10.2307/41165942
- Nonaka I. & Takeuchi H. (2012) *Die Organisation des Wissens: wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen* (2., um ein Vorw. erw. Aufl.; 2nd ed.). Frankfurt am Main [u.a.]: Campus-Verl.
- OECD. (1996) *OECD Economic Outlook, Volume 1996 Issue 1*. Paris: OECD Publishing.
- Rizos V., Behrens A., van der Gaast W., Hofman E., Ioannou A., Kafyke T., . . . Topi C. (2016) Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 8(11), 1212.
- Scipioni S., Russ M., & Niccolini F. (2021) From Barriers to Enablers: The Role of Organizational Learning in Transitioning SMEs into the Circular Economy. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 13(1021), 1021. doi:10.3390/su13031021
- Sillanpää M. & Neibi M. C. (2019) *The circular economy: case studies about the transition from the linear economy*. London: Academic Press.

- Von Schomberg R. (2012) Prospects for Technology Assessment in a framework of responsible research and innovation VS Verlag fur Sozialwissenschaften. <https://renevonschomberg.wordpress.com/definition-of-responsible-innovation/>
- Zhang X. & Gao S. (2011) A Study of the Features and Mechanism of Knowledge Innovation in University Based on Triple Helix Theory. *Management & Engineering*, (3), 61.

CONTACT:

Alexandra Baldwin

Campus 1

7000 Eisenstadt

Email: alexandra.baldwin@fh-burgenland.at

Session 7c

Urbanes Regenwassermanagement

Dezentrales Regenwassermanagement mit ökologischen Nebenwirkungen

Schreiber / Zenebio GmbH / AT

Dezentrales Regenwassermanagement mit ökologischen Nebenwirkungen

U. Schreiber

Zenebio GmbH, Wien, Austria

ABSTRACT: Climate change and the increasing sealing of open soil pose huge challenges for the urban areas. This article compares different approaches to decentralised rainwater management in urban areas with special consideration structural soils. These are often used to the benefit of trees and their root system in a difficult urban environment. The trees are beneficial for the urban climate, provide shade and improve the habitat conditions for humans and animals. They fulfil also a function in storm- and rainwater retention systems. The roots and the soil in the tree pits can also provide a filter for toxins and sediments. Worldwide many municipalities and scientific institutions are or have undertaken research projects for viable solutions that combine stormwater retention and plant bed requirements for urban trees. This article takes a look at a few examples of these green-blue-infrastructure elements, that will hopefully improve the urban environment and make cities more climate resilient and liveable.

1. EINLEITUNG

1.1 KLIMAWANDEL

Der Klimawandel zeigt sich nicht nur in ständig neuen Hitzerekorden, sondern auch in immer häufigeren Starkregenereignissen. Und die wissenschaftlichen Zukunftsszenarien gehen noch von einer Verstärkung dieser Effekte aus.

Nach den Daten der ZAMG fanden die wärmsten 15 Jahre in der über 250-jährigen Messgeschichte in den letzten 26 Jahren statt. Wir konnten schon in den letzten Jahren einen starken Anstieg der Unwetter und Starkregenereignisse vermerken. Was auch kein Wunder ist, wenn man betrachtet, dass von den 15 wärmsten Jahren der Messgeschichte 14 nach dem Jahr 2000 stattfanden. 2020 bestätigt mit einer Abweichung von +2,0 °C zum Vergleichszeitraum 1961-1990 das extrem hohe Temperaturniveau. Das zeigt auch, dass im Alpenraum der Temperaturanstieg gravierender ausfallen wird, als im globalen Mittel. (Hiebl et al. 2020)

Die Modelle für die Niederschlagsentwicklung sind generell schwieriger zu berechnen, als Temperaturmodelle, da es mehr lokale Einflussgrößen gibt. Dies gilt insbesondere für Gebirgsregionen, wie den Alpenraum, wo regionale Wettersysteme einen noch größeren Einfluss ausüben, als in einheitlicheren Gebieten. Die höheren Temperaturen führen zu einer erhöhten Luftfeuchtigkeit und dadurch zu vermehrten Starkregenereignissen. In Verbindung mit der Flächenversiegelung kommt es zu großen Abflussspitzen, die die Kapazität der Kanalsysteme und teilweise auch die der Vorfluter überfordern.

1.2 FLÄCHENVERSIEGELUNG

Im Bereich der Flächenversiegelung nimmt Österreich leider auch einen Spitzenplatz in Europa ein. Die österreichische Hagelversicherung registriert beispielsweise im Schnitt der letzten 3 Jahre (2018 – 2020) eine tägliche Bodenversiegelung von 11,5 ha in Österreich. (Hagelversicherung 2021)

Mögliche Mittel dagegen sind vorhandene Leerstände zu nutzen, Neubauten nur wenn sie wirklich notwendig sind zu verwirklichen, anstatt neue Flächen zu versiegeln lieber auf vorhandenen Bauflächen in die Tiefe und in die Höhe zu bauen und auch bei Sanierungen möglichst offene Oberflächenstrukturen zu wählen. Versickerungssysteme der blau-grünen-Infrastruktur bringen zwar keinen unversiegelten Boden zurück, aber durch die offene Oberflächengestaltung stellen sie den Anschluss an den

Grundwasserkörper wieder her. Durch die Evapotranspiration wird auch ein großer Anteil des Wassers im lokalen Wasserkreislauf erhalten. Durch die lokale Retention bzw. Speicherung von Regenwasser wird die Notwendigkeit große Sickermulden oder ähnliche Bauwerke zu errichten minimiert und dadurch auch der Bodenverbrauch reduziert.

Einerseits geht durch die Bodenversiegelung wertvolle Agrarfläche verloren, andererseits werden dadurch auch Abflussspitzen in der Niederschlagsverarbeitung heraufbeschworen und der Luftaustausch mit dem Bodenleben und dadurch eine CO₂-Speicherung im Boden unterbunden. Außerdem geht der Anschluss an den Grundwasserkörper, durch das Absinken des Grundwasserspiegels, verloren, was in Trockenheitsphasen zu großflächiger Wasserknappheit und Dürre führen kann. In Leipzig hat das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung eine Langzeitstudie über den Zusammenhang zwischen Flächenversiegelung und Wasserhaushalt durchgeführt. Darin hat sich gezeigt, dass sich seit 1940 die Wasserabflussmenge verdreifacht hat, die Versickerungsmenge jedoch um ein Fünftel gesunken ist. Obwohl die Einwohnerzahl deutlich gesunken ist, wurden 10 km² Fläche zusätzlich verbaut und mit dieser Änderung der Flächennutzung änderte sich zwangsweise auch der Wasserhaushalt. Es war aber auch zu sehen, dass Maßnahmen zur Entsiegelung und eine naturnahe Oberflächengestaltung die Situation verbessern können. Obwohl mittlerweile ein gesteigertes Bewusstsein für die negativen Auswirkungen der Bodenversiegelung vorhanden ist, fußt dieses meist nicht auf den ökologischen Auswirkungen, wie der Änderung des Wasserhaushalts, da dies schleichende Veränderungen sind, die nicht so schnell in das kollektive Bewusstsein vordringen. Langfristig können diese Veränderungen Ökosysteme allerdings instabil werden lassen. (Haase & Nuissl 2007)

Für den Bereich des Regenwassermanagements ist die Bewältigung von Starkregenereignissen, die immer häufiger und immer heftiger werden, eine große Herausforderung. Es kann gut sein, dass sich mit zunehmender Häufigkeit die Werte für die Jährlichkeiten, die der Bemessung bestehender Anlagen zu Grunde liegen, in den kommenden Jahren nach oben entwickeln. Schon jetzt stimmen die statistisch erhobenen Jährlichkeiten nicht mehr mit der Wirklichkeit zusammen z.B. wurden in Danzig in den letzten 18 Jahren 4 Regenereignisse mit einer Jährlichkeit von 100 registriert. (Wojciechowska et al. 2015)

1.3 HERAUSFORDERUNGEN

Auf der anderen Seite sollten die Niederschläge unbedingt dem lokalen Grundwassersystem zugeführt werden. Die Grundwasserpegel sinken leider ebenfalls in vielen Gebieten, bedingt durch klimatische Faktoren, aber auch durch menschliche Baumaßnahmen. Die fortschreitende Bodenversiegelung führt in Verbindung mit der Ableitung in Regenwasserkanäle und ähnliches zu einer teilweisen Entkoppelung der Niederschlagsmengen vom lokalen Grundwasserkörper. Die harte Verbauung der Gewässer, die wir in den letzten Jahrzehnten aus Hochwasserschutzgründen betrieben haben führt ebenso zum Absinken des Grundwasserspiegels. (Haase & Nuissl 2007)

Es ist ein Umdenken im Gange, aber dieses erfordert teilweise Rückbauten bestehender Bauwerke und engagierte, nachhaltige Umsetzung von neuen Projekten. Aus diesen Szenarien ergeben sich auch für Kommunen und Bauträger zahlreiche neue Herausforderungen.

Eine davon ist, dass sich die bestehende Kanalinfrastruktur (auch die Regenwasserkanalisation) oft schon an der Auslastungsgrenze befindet. Daher gibt es in immer mehr Kommunen Regelungen, dass bei Neubauten das anfallende Regenwasser auf der Projektfläche versickert werden muss. Auch bei einer Erneuerung der Verkehrsinfrastruktur ist die Versickerung des Regenwassers ein großes Thema. Natürliche Vegetation hat in der Wasserbilanz einen Oberflächenabfluss von 10 %, 40 % Evapotranspiration und 50 % Infiltration, während eine versiegelte Fläche einen Oberflächenabfluss von 55 %, 35 % Evapotranspiration und 15 % Infiltrationsleistung bieten. (U.S. Environmental Protection Agency 2003)

Von dieser Problemlage ausgehend forschen europaweit mehrere Universitäten und private Unternehmen an innovativen Lösungen im Bereich des dezentralen Regenwassermanagements. Auch gibt es weltweit schon einige lang erprobte und bewährte Systeme, die sich für die Verwendung von Grün-Blauer-Infrastruktur im Bereich des Regenwassermanagements und der Stadt- und Infrastrukturplanung und in der Umsetzung bei Bauvorhaben anbieten. Ich habe exemplarisch einige Beispiele herausgepickt und verglichen.

2. VERGLEICH DEZENTRALE VERSICKERUNGSSYSTEME

2.1 MELBOURNE SYSTEM – RAINGARDEN

Die Herausforderung die zur Entwicklung des Melbourne System für Baumrigolen führte, ist dass es im Großraum Melbourne immer wieder zu Überflutungen in Folge von Starkregenereignissen kommt. Durch eine generelle Auslegung des Kanalsystems als Mischwasserkanal kommt es nicht nur zu Überflutungen, sondern auch zur Kontaminierung der Oberflächenwässer und auch des Trinkwassers. Daher kommt der Retention von Starkregenereignissen noch eine zusätzliche Bedeutung zu. Durch die Filterwirkung der Bepflanzung und des belebten Bodens soll die Verfrachtung von Nährstoffen, Toxinen, Müll und Sedimenten in die Vorfluter verhindert bzw. reduziert werden.

Zum Unterschied zu normalen Pflanzbeeten, müssen die Raingarden-Flächen nach Starkregenereignissen von Müll- und Sedimentablagerungen gereinigt werden, um die Versickerungsleistung zu erhalten. Sie dürfen nicht gedüngt werden – die Nährstoffzufuhr durch die Niederschlagsereignisse sollte ausreichend sein. Auch eine Verwendung von Pflanzenschutzmitteln ist verboten. Es muss eine Überstauhöhe von 20 cm bis 50 cm gegeben sein.

Als Substrat wird ein spezieller lehmiger Sand verwendet, der sowohl eine rasche Versickerung, als auch eine entsprechende Filterleistung gewährleistet. Außerdem muss das Material genügend Wasserspeicher für die Bepflanzung aufweisen und als Pflanzmedium geeignet sein. Es gibt auch eine Liste mit empfohlenen Pflanzen für die Ausführung eines Raingardens. Diese müssen über die Wurzeln die Versickerungsfähigkeit des Substrates erhalten, einen Beitrag zum Abbau der Schadstoffe liefern, in sandigem Boden wachsen können, sowie längere Trockenperioden zwischen den Regenfällen ertragen können.

Die Größe der Raingarden-Flächen kann über 100 m² betragen und sollte 1-2 % der Fläche des Einzugsgebietes bedecken. Die Errichtung eines Raingarden wird sowohl für private, als auch öffentliche Flächen empfohlen. Sollte Bautätigkeit in dem betreffenden Einzugsgebiet stattfinden, sind die Versickerungsflächen möglichst nach Beendigung der Bautätigkeiten zu bauen, um eine Verschlämmung durch Austräge der Baustellen zu verhindern. Die Basis der Versickerungsgrube muss sich über dem Grundwasserspiegel befinden, um einen Aufstau zu verhindern und eine Versickerung und Filterung zu gewährleisten.

Generell sollen mit dem Melbourne-System vor allem moderate Niederschlagsereignisse retentiert werden. Für Starkregenereignisse muss ein Überlauf in das Kanalsystem, inklusive einer Absetzvorrichtung für die Schadstoffe gebaut werden.

Es gibt umfangreiche und frei zugängliche Planungsunterlagen und Anleitungen, um das System möglichst weit zu verbreiten. (Payne et al. 2015)

2.2 CU STRUCTURAL SOILS®

In mehreren Städten weltweit führte die Beobachtung, dass sich Stadtbäume in einer nahezu lebensfeindlichen Umwelt befinden und die Bedingungen zu einem vorzeitigen Absterben bzw. zu einer schlechten Entwicklung und geringen Vitalität führen, zu Versuchen die Lebensraumbedingungen für die Bäume zu verbessern. Für einen langfristig vitalen Baum ist in der Stadt, neben den klimatischen Widrigkeiten und dem Schadstoffeintrag, vor allem der sehr beschränkte Wurzelraum ein großes Hindernis. Die Flächenkonkurrenz mit Kanal- und Kabeleinbauten, Verkehrsflächen, usw. führt dazu, dass den Straßenbäumen nur sehr wenig Raum, vor allem auch unterirdisch, zur Verfügung steht. Bei Einbauten nach der Etablierungsphase des Baumes wird der Wurzelraum oft zusätzlich beschränkt bzw. die bereits gewachsenen Wurzeln verletzt und der Baum dadurch teilweise nachhaltig geschädigt. Steht zu wenig Wurzelraum zur Verfügung kommt es teilweise zu Schäden an der Infrastruktur, wenn sich die Baumwurzeln ihren Weg unter Gehsteigen oder der Fahrbahn in erschließbare Regionen suchen. Der direkt an die Pflanzmulden anschließende Boden ist meist stark verdichtet, schlecht wasser- und nährstoffversorgt und dadurch als Wurzelraum kaum oder gar nicht nutzbar. Das alles führt zu einer Unterversorgung und schlechten Entwicklung der so dringend benötigten Stadtbäume.

Die Stadt Amsterdam hat bereits in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts erste Versuche zu einer Verbesserung der Untergrundbedingungen für ihre Straßenbäume durchgeführt. Dabei wurde der Amsterdam Treesoil entwickelt und in den 70er Jahren in Groningen zum Skeleton Soil weiterentwickelt. Es kam weltweit zu ähnlichen oder Weiterentwicklungen von Structural Soils.

Die Cornell University in New York entwickelte in den 90er Jahren den CU-Structural Soil®, der auch patentiert wurde. Hierbei wird ein grober Skelettboden als zusätzlicher Wurzelraum für die Straßenbäume vorgesehen. Dieser Boden kann die Lasten, die für die Herstellung von Verkehrsflächen, durch die notwendige Verdichtung, erforderlich sind aufnehmen und bleibt trotzdem so porös, dass für die Baumwurzeln noch genügend Lebensraum erhalten bleibt. Die Zwischenräume werden zusätzlich mit einem speziellen lehmigen Substrat gefüllt, um die Wasser- und Nährstoffversorgung zu gewährleisten. Um eine gleichmäßige Mischung und Haftung während des Transports und Einbaus zu gewährleisten wird vor der Mischung ein Haftmittel aufgebracht. Das verwendete Produkt Gelscape® kann außerdem große Mengen Wasser speichern ist ungiftig und wird auch zur Bodenverbesserung verwendet. Allerdings handelt es sich dabei um ein künstliches, kristallines Hydrogel auf Erdölbasis.

Das System das die CU-Structural Soils® bietet hat sich bewährt und kann auch für die nachträgliche Verbesserung von Baumstandorten verwendet werden. Hierfür können z.B. Teile des Gehsteigs mit dem Substrat unterfüllt werden und stehen dadurch den Bäumen als zusätzlicher Wurzelraum zur Verfügung.

Als Richtwert kann man annehmen, dass für einen m^2 Kronenprojektionsfläche 2 m^3 Wurzelraum zur Verfügung stehen müssen – dies natürlich gerechnet auf die zu erwartenden Dimensionen des ausgewachsenen Baumes. (Bassuk et al. 2015)

2.3 STOCKHOLM SYSTEM

Das Stockholmer System schlägt in die gleiche Kerbe, den Stadtbäumen genügend Wurzelraum zur Verfügung zu stellen.

Was den beiden Systemen gemeinsam ist, dass die großen potenziellen Wurzelräume auch als Versickerungs- und Retentionsraum für die Oberflächenwässer zu Verfügung stehen und somit das Schwammstadt-Prinzip vertreten. Außerdem wird die Oberflächenversiegelung durch die empfohlene und immer öfter angewendete offene Oberflächengestaltung hintangehalten und der lokale Wasserkreislauf bleibt erhalten.

Der Aufbau des Stockholmer Systems ist noch detaillierter, wobei eine Bewässerungs- und Belüftungseinrichtung in Form eines Schachts gegeben ist. Außerdem wird das Zwischenmaterial für das Grobkorn erst nach dessen Einbau eingebracht – durch Einschlämmung. Das hat einerseits den Vorteil auf das Haftmittel verzichten zu können, andererseits ist der Einschlämmvorgang relativ aufwendig und erfordert eine große Wassermenge. Der Aufbau des Zwischenmaterials ist ebenfalls ein völlig anderer und basiert auf aktivierter Pflanzenkohle, die mit Nährstoffen angereichert wurde. (Embren et al. 2009)

Unter anderem wird derzeit in Hamburg und Berlin an einer Weiterentwicklung des Stockholmer Systems unter dem Titel Baumrigole gearbeitet. Das Ziel ist eine bessere Wasserversorgung der Stadtbäume in Baumrigolen in immer heißerer Stadtumgebung. Hierbei wird direkt unter dem Wurzelkörper eine zusätzliche Überstauwanne installiert, um die Wasserversorgung der Bäume noch zusätzlich zu verbessern, wodurch allerdings teilweise die Gefahr von Staunässe für den Baum gegeben ist. (Richter 2021)

2.4 SYSTEM DRAINGARDEN®

Eine österreichische Entwicklung die auf die Versickerung von Oberflächenwasser in Kombination mit einer Bepflanzung setzt ist das System DrainGarden®. Bei Rasensickermulden ist derzeit eine Bepflanzung mit Bäumen nicht erlaubt – wahrscheinlich ist der Hintergrund der Anfall von organischem Material, der zu Verschlammungen führen kann, sowie die Befürchtung, dass sich entlang der Wurzelkanäle Wasserwege bilden, die die notwendige Filterwirkung des Substrates unterbinden. Dieser Effekt wird in der Fachwelt sehr in Frage gestellt. Auch gibt es z.B. in Berlin Bestrebungen Bäume in Rasensickermulden zu pflanzen und dadurch die bessere Wasserversorgung in den Sickermulden für die Bepflanzung und somit auch den lokalen Wasserhaushalt zu nutzen.

Das System DrainGarden® verwendet eine Kombination aus zwei speziell gemischten Substraten. Diese Mischung hat die Fähigkeit sehr viel – bis zu 30 % des Substratvolumens – an Wasser pflanzenverfügbar zu speichern. Zusätzlich wird die geforderte Filterleistung für normal verschmutzte Straßenflächen und eine hohe Versickerungsleistung gewährleistet. Das Obersubstrat ist allerdings nicht verdichtbar bzw. zerstört eine Verdichtung oder Verschlammung die Fähigkeit zur Versickerung. Da die Nährstoff- und Wasserversorgung für die Bepflanzung allerdings auch bei geringeren Kubaturen gegeben ist, eignet sich das System besonders für Versickerungslösungen mit entsprechender Bepflanzung, wenn der vorhandene Platz beschränkt ist. Ziel für die DrainGarden® Anlagen ist die Versickerung von mindestens 30-jährlichen Niederschlagsereignissen zu ermöglichen. Wenn die Regenereignisse zu rasch erfolgen, stößt allerdings auch hier trotz entsprechender qualifizierter Bemessung die Versickerungsleistung an ihre Grenzen. Dennoch bietet sich hier eine wertvolle Ergänzung im Portfolio des dezentralen Regenwassermanagements, das auch für die gepflanzten Bäume ideale Wachstumsbedingungen bietet, solange der angrenzende Boden die Möglichkeit einer Durchwurzelung bietet.

3. SCHLUSSFOLGERUNG

Generell haben Simulationen gezeigt, dass die retentive Wirkung von grün-blauer-Infrastruktur bei sehr starken Regenereignissen begrenzt ist und hier für einen effektiven Schutz noch zusätzliche technische Möglichkeiten erforderlich sind. Es werden zwar Wassermengen zurückgehalten und Abflussspitzen geglättet bzw. verzögert, aber je nach Stärke des Ereignisses, kommt es dennoch zu Überflutungsszenarien. Es können natürlich auch großflächige Retentionsräume zur Entlastung wiedergeöffnet oder geschaffen werden. Es muss bei hohem Gefahrenpotenzial die Abflusssituation im gesamten Einzugsgebiet betrachtet und verbessert werden. Hierzu gehört auf jeden Fall auch die Nutzung von Grünflächen, Gründächern, Entsiegelung von Oberflächen und Schaffung von zusätzlichen Versickerungsmöglichkeiten im urbanen Bereich.

Auch diese mehrfach (z.B. als Erholungs-, Sport-, Weideflächen, ...) nutzbaren Retentionsräume sind Teil eines ökologischen Regenwassermanagements, der blau-grünen- Infrastruktur und müssen bei der urbanen Planung dringend berücksichtigt und umgesetzt werden. Außerdem können wir aus klimatischen Überlegungen und um die Stadt als wertvollen Lebensraum nutzen zu können nicht auf diese wertvollen Grüninseln in unseren sonst sehr kargen Stadtsteinwüsten verzichten.

Die Umsetzung von blau-grüner Infrastruktur ist auch stark vom politischen Willen abhängig. Es sind bereits verschiedenste technische Lösungsansätze vorhanden und diese werden noch stetig weiterentwickelt. Wenn im Umfeld ein Paradigmenwechsel stattfindet, kann der Wandel hin zu mehr blau-grüner-Infrastruktur sehr schnell vonstatten gehen, wie sich auch in Berlin momentan zeigt, wo bei nahezu allen neuen Bauprojekten auf diese gesetzt wird bzw. diese zumindest ein Teil des Bauvorhabens ist.

Es gibt viele verschiedene Systeme, die sich in Details, Ansätzen, Aufbauten und auch Aufwand unterscheiden. Diese werden auch ständig weiterentwickelt, um den Aufwand, bei Erzielung möglichst guter Ergebnisse, möglichst gering zu halten.

Alle diese Systeme erzeugen auch die positiven klimatischen und optischen Effekte durch die Bepflanzung mit Bäumen. Sie schaffen langfristig Lebensraum für Bäume und erhalten deren Vitalität. Nur so können wir die Fähigkeiten der Bäume nachhaltig im urbanen Umfeld nutzen und unsere Städte lebenswerter und klimaresilienter machen.

LITERATUR

- Bassuk N., Denig B.R., Haffner T., Grabosky J. & Trowbridge P. (2015) CU-Structural Soil® A Comprehensive Guide.
- Embren, B., Alvm B.-M., Stal Ö., Orvesten A. (2009) Planting beds in the city of Stockholm – A handbook, Traffic department, City of Stockholm, Sweden.

- Haase D. & Nuissl H. (2007) Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy? The case of Leipzig (Germany) 1870-2003. *Landscape and Urban Planning* 80 (1-2), 1-13.
- Hagelversicherung (2021) oehv_folder_boden_2021-1.4_web (Österr. Hagelversicherung)
- Hiebl J., Chimai B., Ganekind M., Höfler A. & Orlik A. (2020) Österreichisches Klimabulletin Jahr 2020, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Austria.
- Richter M. (2021) Straßenbäume als zukunftsfähige Multitalente, Bluegreenstreets optimiert das urbane Regenwassermanagement und die Vitalität von Straßenbäumen durch multifunktionale Straßenraumgestaltung, HafenCity Universität, Hamburg, Germany.
- Payne E.G.I., Hatt B.E., Deletic A., Dobbie M.F., McCarthy D.T. & Chandrasena G.I., (2015) Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems, Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.
- U.S. Environmental Protection Agency (2003) Protecting Water Quality From Urban Runoff. EPA 841-F-03-003. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Wojciechowska E., Gajewska M., Żurkowska N., Surówka M. & Obarska-Pempkowiak H. (2015) Zrównoważone systemy gospodarowania wodą deszczową. (Sustainable Rainwater Management Systems). Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland.

KONTAKTDATEN:

Ulrich Schreiber
St. Pöltenerstraße 116
3130 Herzogenburg
Email: u.schreiber@zenebio.at

Poster

Fresh air in the school classrooms

Štefanič, Straková / TU Bratislava / SK

Interaktive Webanwendung für nachhaltiges, grün-blaues Regenwassermanagement

Minixhofer, Weiss, Stangl / BOKU / AT

Berger / Green4Cities GmbH / AT

Szeliga / DIE ANTWORT – Büro für Informationstechnik GmbH / AT

Das Gründach - das bessere Flachdach. Der Beitrag von Gründächern zur Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren

Vondrus / CV-Consulting e.U. / AT

Erker / Slavonia Baubedarf GmbH / AT

Stefenelli / Stauss Perlite GmbH / AT

Design optimization of a heat distribution during the reconstruction of the DH networks

Švarcová, Petráš / TU Bratislava / SK

Štefanec / NRG flex s.r.o / SK

Partizipative und nachhaltige Entwicklung eines Regelwohnbaus

Höfler, Fulterer / AEE INTEC / AT

Brown, Schwarz, Platzer / schwarz.platzer architekten / AT

Überbacher, Jankovic / WEGRAZ / AT

Hammerl, Oswald, Schnitzer, Turek / StadtLABOR / AT

Fresh air in the school classrooms

P. Štefanič, Z. Straková

Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services, Slovak Republic

ABSTRACT: One of the basic problems of school buildings is the unsatisfactory thermal insulation properties of peripheral building structures. Absolutely unsatisfactory, especially in terms of the creation and long-term maintenance of microclimatic conditions in the classroom, is the complete absence of mechanical ventilation systems. In almost all schools, ventilation is based on the natural exchange of air through windows. Such a solution is no longer satisfactory today. In general, in many places it is also forbidden to open windows during breaks for safety reasons. The quality of the indoor environment of school buildings has a direct impact on the ability to concentrate and the attention of teachers and students.

1. INTRODUCTION

Facilities for children and youth are established in a health-friendly environment, which is protected from harmful environmental factors, especially against noise and air pollution sources, and the environment protected from negative educational influences (Act no. 355/2007 Coll.). As well as the building of schools should be non-toxic environment, also the school building itself, to be wholesome environment for pupils and students. However, most school buildings were established in the last century. Some have been reconstructed, but in spite of the condition of the indoor microclimate is still unsatisfactory. It is important that the microclimate conditions in schools will be as good as possible for proper functioning of the classroom. Natural ventilation through windows is a good habit, but it does not guarantee sufficient air exchange and is counterproductive for schools located in busy areas. It is also not a good solution in terms of energy savings and the risk of children's exposure to disease, due to temperature changes in the cold months.

2. REQUIREMENTS FOR INTERNAL MICROCLIMES IN EDUCATION BUILDINGS IN LEGISLATION

Microclimate conditions for school buildings can be found in several Slovak legal regulations, which are binding. The most important are the following documents:

- Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic no. 259/2008 Coll. (Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic no.124/2017 Coll.- amendment to the decree), which lays down details on the requirements for the indoor environment of buildings and on the minimum requirements for lower standard flats and accommodation facilities.

In the Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic no. 259/2008 Coll. the Tab. 1 defines exactly what parameters of microclimate for school buildings.

Tab. 1: Parameters of microclimate for rooms with special requirements

Space	t_0 (°C)	φ (%)	n (h ⁻¹)
Facilities for children and youth			
playrooms and bedrooms for children up to 6 years of age	at least 22	30 to 70	5
washrooms and toilets for children under 6 years of age	at least 24	30 to 70	8
classrooms, games rooms, living rooms	20 to 24	30 to 70	3 to 8
gyms	15	30 to 70	5
changing rooms at gyms	at least 20	30 to 70	5
washrooms and toilets at gyms	at least 24	30 to 70	8
other changing rooms, corridors, toilets	at least 15	30 to 70	5
Schools, pre-school facilities			
gyms	15 to 17	30 to 70	5
nursery and kindergarten bedrooms	18 to 20 ^{e)}	30 to 70	5
classrooms, games rooms, living rooms	20 to 24 ^{e)}	30 to 70	3 to 8
isolation room	22 to 24	30 to 70	5

e) In pre-school facilities, t_0 values are determined 0.5 m above the floor.

- Decree of the Ministry of Regional Development of the Slovak Republic no. 527/2007 Coll., which lays down details on requirements for facilities for children and youth.

The above-mentioned document, specifically in §6 Operation of facilities for children and youth, sets out the conditions for heating, air exchange and also defines the supply of drinking water.

Heating - paragraph 2:

- in the pre-school facility and in the establishment for the care of pre-school children, the temperature in the playroom and bedroom was ensured to be at least 22 °C and in the washroom and toilet at least 24 °C,
- in the facilities for children and young people, in addition to the facilities for children and youth mentioned in the previous point, the temperature was ensured:
 - classrooms and other rooms in which pupils work for four hours or more, at least 20 °C,
 - rooms intended for teaching physical education at least 15 °C,
 - changing rooms set up in areas intended for teaching physical education at least 20 °C,
 - changing rooms and other areas for storing pupils' outer clothing at least 15 °C,
 - corridors and toilets at least 15 °C.

Air exchange – paragraph 4:

- in classrooms 20 m³/hour - 30 m³/hour per student,
- in areas intended for teaching physical education 30 m³/hour per student,
- in changing rooms and other areas intended for storing outer clothing 20 m³/hour in one place,
- in washrooms 30 m³/hour per washbasin,
- showers 150 m³/hour up to 200 m³/hour for one shower,
- toilets 50 m³/hour per cubicle and 25 m³/hour per urinal.

Non-binding but professionally recommended technical norms include:

- Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6

Due to the fact that the creation of an indoor environment with centrally conditioned air requires large air distribution systems and relatively high energy requirements, in the vast majority of cases it is customary to design volume of air handling unit only on the so-called hygienic minimum, which means ensuring that the legislation provides sufficient fresh air for people (Čurik 2010).

In each of the above documents you can find a mention of why, how and when to ventilate. The mentioned technical standard STN EN 16798-1: 2019 defines exactly how school premises should be ventilated (Tab. 2).

Tab. 2: Examples of recommended operating temperature design values for the design of buildings and environmental engineering systems

Type of building (space)	Category	Operating temperature (°C)	
		Minimum for heating (winter season) ~ 1,0 clo	Maximum for cooling (summer season) ~ 0,5 clo
Offices and rooms with similar activities (separate offices, open offices, conference rooms, auditoriums, cafes, restaurants, classrooms) sedentary activities 1.2 met	II	20,0	26,0

3. EXPERIMENTAL MEASUREMENT

A measurement of selected parameters of the indoor environment lasting 42 days was performed in the kindergarten.

3.1 MEASUREMENT TARGET

The aim of the experimental measurement was:

- verify that the indoor air temperature, relative indoor air humidity and carbon dioxide (CO₂) concentration in the kindergarten premises meet the requirements set out in the relevant legal documents and technical standards,
- assess whether legal and standard requirements are met, otherwise determine the reasons for non-compliance.

3.2 MEASUREMENT METHODOLOGY

3.2.1 Methodology in terms of measured parameters of the internal environment

The most important of the measured parameters was the indoor air temperature. All used recorders were equipped with a sensor for measuring the temperature and relative humidity of the indoor air.

The criterion for the thermal environment in the cold period is the lower limit value of the operating temperature t_0 of the indoor air. The following applies to the calculation of the operating temperature:

$$t_0 \cong \frac{(t_a + t_{mr})}{2} \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

where:

t_a is the air temperature ($^\circ\text{C}$),

t_{mr} is the mean radiant temperature of the surrounding surfaces ($^\circ\text{C}$).

If the temperature of the surfaces in the room is approximately the same as the temperature of the indoor air in the room, the operating temperature can be exchanged for the indoor air temperature during practical measurements.

3.2.2 Methodology in terms of measuring instruments

Measurements of indoor air temperature, indoor air relative humidity and CO_2 concentration were performed using Comet (U3430) recorders (Fig. 1).



Fig. 1: Recorder Comet U3430

Measuring range and measuring accuracy of sensors:

- Temperature sensor: -20 to $+60$ $^\circ\text{C}$, ± 0.4 $^\circ\text{C}$,
- Humidity sensor: 0 to 100 % RH, ± 1.8 % (at a temperature of 23 $^\circ\text{C}$ in the range of 0 to 90 % RH),
- CO_2 sensor: 0 to 5.000 ppm, $\pm (50$ ppm $+ 3$ % of measured value) at 25 $^\circ\text{C}$.

3.2.3 Methodology in terms of time and measurement conditions

The measurement of selected quantities took place in the period from 22.03.2021 to 03.05.2021, i.e. 42 full calendar days, including weekends. Values were recorded at minute intervals. Due to the ongoing pandemic situation, the premises could be used by fewer children than usual.

3.2.4 Methodology in terms of sensor placement

The measuring points were selected on the basis of an agreement with the principal of the kindergarten. At the same time, the purpose of the measurement was the even distribution of recorders and recording of measured quantities in different types of rooms (in the bedroom and game room).

Recorders intended for continuous measurement were placed mainly on tables and cabinets. One of the recorders was hung in the middle of the room. All were informed about the ongoing measurements and were asked to take extra care to avoid shifting or damage to the measuring recorders.



Fig. 2: Location of recorders - ●

3.3 ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS

3.3.1 Requirements for indoor microclimate

The measurement was focused on the assessment of the microclimate as well as the quality of indoor air in selected rooms. The most significant factors that affect the microclimate are the temperature and relative humidity of the indoor air. In air quality, the decisive measured quantity was the concentration of carbon dioxide CO₂.

Tab. 3: Optimal conditions of indoor microclimate and air quality

Season of the year	Temperature of indoor air t (°C)		Permissible air velocity v (m/s)	Permissible relative humidity φ (%)	CO ₂ Concentration (ppm)	
	optimal	permissible				
		min.				max.
Warm V-IX	23 - 27	20	28	≤ 0,25	30 to 70	350 to 1500
Cold IX-V	20 - 24	18	26	≤ 0,20	30 to 70	350 to 1500

3.3.2 Measurement results

The results of measurements in the game room are shown in the graphs in Fig. 3.

The thermal state in the game room at the individual measuring points in accordance with the requirements defined in legal and technical regulations was acceptable, as the indoor air temperature during the entire measurement period in the cold period was 20 to 24 °C. However, at certain measuring points in the cold season, the indoor air temperature was exceeded at certain times during the day, when the temperature dropped below 18 °C or rose above 24 °C. Tab. 3 shows that the maximum allowable temperature is 26 °C. In this context, the environment can be characterized in terms of thermal state as acceptable, but not ideal.

The humidity in the game room at the individual measuring points in connection with the requirements defined in legal and technical regulations was acceptable, as the relative humidity of the indoor air during the entire measurement period was in the range of 30 to 70 %.

The quality of the indoor air at the individual measuring points in accordance with the requirements defined in the legal and technical regulations was partially acceptable, as at certain points the CO₂ concentration values were higher than the recommended limit value of 1500 ppm.

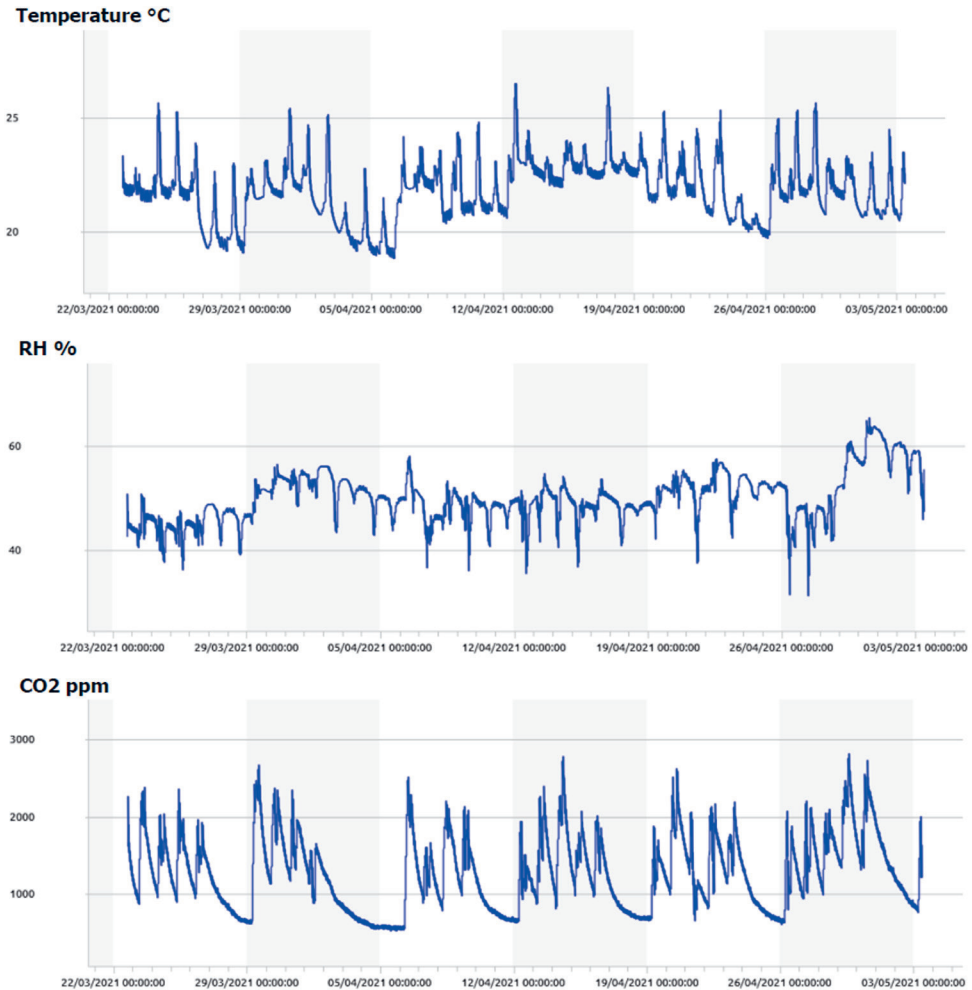


Fig. 3: Graphs of measured quantities - Game room

4. CONCLUSION

Some of the measured points show an acceptable state of both microclimate and indoor air quality, while others reach this state only in certain time intervals, but there are measured values where the state of the indoor environment is unacceptable. One of the solutions that can significantly improve the quality of indoor air in the school classroom is mechanical decentralized ventilation with a very unconventional location (under the sill) of the air handling unit. These are not local (room) ventilation units, this is a new solution that is still in the development phase.

REFERENCES

- Act no. 355/2007 Coll. Of the Slovak Republic on the protection, promotion and development of public health and on the amendment of certain.
- Čurik, M. (2010) The Required Air Exchange in Buildings – How to be acquainted in current legislation. In: TzB Haustechnik 4/2010, 48-50, ISSN 1210-356X.
- Decree No. 259/2008 Coll. Ministry of Health of the Slovak Republic on the details of the requirements for the indoor environment of buildings and the minimum requirements for lower standard flats and accommodation facilities.
- STN EN 16798-1: 2019, Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6.

CONTACT:

Pavol Štefanič, Ing.
Radlinského 2766/11
81005 Bratislava, Slovakia
Email: pavol.stefanic@stuba.sk

Interaktive Webanwendung für nachhaltiges, grün-blaues Regenwassermanagement

P. Minixhofer, O. Weiss, R. Stangl

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich

A. Berger

Green4Cities GmbH, Wien, Österreich

S. Szeliga

DIE ANTWORT – Büro für Informationstechnik GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Urban regions are particularly affected by heavy rain and extreme weather events, as a large part of the precipitation has to be drained into the sewage system due to land sealing. A remedy can be found in sustainable, integrative stormwater management. The combination of different green-blue infrastructures can buffer precipitation and make valuable rainwater available for urban flora and fauna. The planning, execution and operation of such plants often poses major problems for those concerned due to the complexity and abundance of system solutions, as a result of which the full retention potential is not fully exploited. The exploratory project INReS (Integration of sustainable rainwater management tools into the planning, execution and management software (BIM)) aims to prepare a web application to support the identification of suitable rainwater management tools. In the project year, the internal processes of an interactive web application and the associated database were identified, reviewed and assessed. Within the scope of this project, the preparations for an interactive web application were successfully implemented. During an analysis of the internal interfaces, BIM compatibility could be technically proven. It is also technically possible to incorporate data from digital maps, such as eBod (digital soil map) or eHyd (digital hydrographic map), to create use- and site-specific results. By considering specific parameters for infiltration systems, vertical greening and green roofs, the appropriate stormwater management measures can be recommended for interested parties. At the end, factsheets provide detailed information in compact form on the respective results, so that an initial overview of possible measures can be gained. In the context of a further project, an implementation of the interactive stormwater toolbox and extended BIM-World on a web app basis is aimed at by submitting a demo project. This holistic approach of a simple, user group-optimized web application, complemented by maximum compatibility with BIM, covers the needs of almost all potential stakeholders in the best possible way and guarantees broad applicability.

1. EINLEITUNG

Klimawandelbedingt häufen sich in den letzten Jahren Starkregen- und Extremwetterereignisse (Dankers und Hiederer 2008). Urbane Regionen sind besonders stark davon betroffen, da durch Flächenversiegelung ein Großteil des Niederschlags in die Kanalisation abgeleitet werden muss, wodurch für Kommunen enorme Kosten entstehen. Abhilfe kann ein nachhaltiges, integratives Regenwassermanagement schaffen. Die Kombination unterschiedlicher Grün-Blauer-Infrastrukturen, wie z.B. Dach- und Fassadenbegrünung sowie Retentionslösungen, können den Niederschlag puffern und dieses wertvolle Wasser für die urbane Flora und Fauna verfügbar machen (Grimm 2010; MA 22 2011). Durch Verdunstungskühlung kann die städtische Überhitzung reduziert und die Lebensqualität für die Bewohner*innen gesteigert werden (Moss et al. 2019). Planung, Ausführung und Betrieb solcher Anlagen stellen Betroffene aufgrund der Komplexität und der Fülle an Systemlösungen häufig vor große Probleme, wodurch das volle Retentionspotenzial nicht ausgeschöpft wird.

Im Rahmen des Sondierungsprojektes INReS (Integration nachhaltiger Regenwassermanagement-Tools in die Planungs- Ausführungs- und Bewirtschaftungs-Software (BIM)) soll eine Webanwendung vorbereitet werden, welche potenzielle Nutzer*innen dabei unterstützt, passende Regenwassermanagement-Tools zu finden. Im Projektjahr werden die internen Prozesse einer interaktiven Webanwendung und die dazu gehörende Datenbank erarbeitet, überprüft und weiterentwickelt. Um eine größtmögliche Verbreitung und bestmögliche Integration der Datenbank in alle Phasen eines Projektes sicherzustellen, ist eine Kompatibilität mit dem Building Information Model (BIM) unabdingbar (Luckwald and Temmen 2017). Hierdurch können unterschiedliche Stakeholder und Gewerke auf Daten zugreifen, diese gemeinsam bearbeiten und im Falle von Planänderungen schnell und ohne Informationsverlust reagieren. Die erforderlichen Schnittstellen, Standards und Parameter werden in diesem Projekt erarbeitet.

Dieser Artikel beschäftigt sich mit der folgenden Forschungsfrage: Welche Voraussetzungen sind für eine interaktive Webanwendung essentiell, um geeignete Maßnahmen im Umgang mit Regenwasser im Bestand sowie bei Neubauten identifizieren und empfehlen zu können?

2. VORBEREITUNG: INTERAKTIVE WEBANWENDUNG

2.1 GRUNDSTRUKTUR DER WEBANWENDUNG

Das Grundgerüst für eine interaktive Web-Applikation stellt eine Systemdatenbank (Regenwasser (RW) Database) dar, die Interessierte (Regenwasser-Toolbox) und Expert*innen (BIM World) bei der Planung und Ausführung unterstützen soll (siehe Abb. 1).

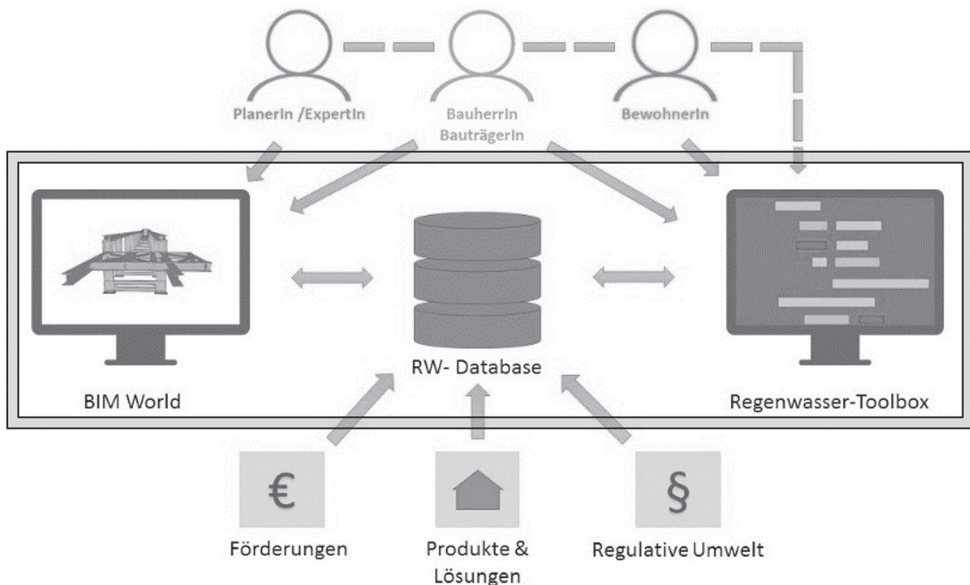


Abb. 1: Übersicht über die Stakeholder und Bestandteile der Webanwendung.

Auf einfache Art und Weise sollen nutzungsgruppenspezifische sowie projektbezogene Lösungsansätze für ein nachhaltiges Niederschlagsmanagement aufgezeigt werden. Basierend auf der umfangreichen RW-Datenbank sowie vordefinierten Parametern werden so Best-Practice-Modelle für unterschiedliche Bebauungstypen erstellt und über eine Webanwendung zugänglich gemacht. Der Fokus dieses Artikels liegt auf der Aufbereitung der Regenwasser-Datenbank, internen Schnittstellen, Kompatibilität mit BIM und Vorbereitung einer Beta-Version für die Webanwendung.

2.2 REGENWASSER-DATABASE

Im Hintergrund der Webanwendung befindet sich die RW-Database, in der die Parameter hinterlegt sind, die zu einer Empfehlung konkreter Regenwassermanagementmaßnahmen führen.

Die Parameterkategorien können angepasst werden, um ein möglichst breites Spektrum an Maßnahmen der einzelnen Anwendungsgebiete für Versickerungsanlagen, Fassaden- und Dachbegrünungen abzubilden (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Auswahl an Parametern der Systemdatenbank RW-Database für die Anwendungsgebieten Versickerungsanlage, Fassaden- und Dachbegrünung.

Parameterkategorien	Versickerungsanlage	Fassadenbegrünung	Dachbegrünung
Technische Kennwerte	Schichthöhe Einbauhöhe	Gewicht	Neigung Tragfähigkeit
Regenwassermanagement	Wasserspeicherfähigkeit Infiltrationsgeschwindigkeit	Retentionsvermögen	Abflusspende Abflussbeiwert
Mehrwehrt	Ökologischer und sozialer Mehrwehrt Kombination mit Photovoltaik Aufenthaltsqualität		
Kosten	Errichtung Pflege, Wartung, Erhalt		
Systemische Komponenten	Substrat Vegetation Material		

Um eine Möglichkeit zu finden diese Parameter in weiterer Folge in der Regenwasser-Toolbox oder BIM World zu berücksichtigen und mit den Bedürfnissen der Nutzer*innen zu koppeln, gilt es interne Schnittstellen zu identifizieren.

2.3 INTERNE SCHNITTSTELLEN

Um die Lösungsansätze für ein nachhaltiges Regenwassermanagement projektbezogen und auch nutzungsspezifisch verfügbar zu gestalten, gilt es vorab die internen Schnittstellen zu identifizieren. Es wird notwendig sein, die einzelnen Maßnahmen vororten und projektbezogen anpassen zu können. Dafür wird aufbauend auf der RW-Database die Kompatibilität mit den externen Datenbanken eBod und eHyd und die BIM-Kompatibilität überprüft.

2.3.1 Externe technische Datenbanken

Um abzuklären, ob eine Abfrage relevanter Daten für die Nutzung in einer Webanwendung möglich ist und eine räumliche Zuordnung stattfinden kann, wurden im Zuge des Projektes eine Analyse der digitalen Karten eHyd (Hydrographiekarte Österreich des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, www.ehyd.gv.at) und eBod (Bodenkarte Österreich des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, www.bodenkarte.at) durchgeführt.

Die Karteninhalte der eHyd zeigen hydrographische Kennwerte für Österreich, insbesondere den Bemessungsniederschlag, und werden maximal jährlich aktualisiert (Bundesministerium für Landwirtschaft Regionen und Tourismus 2011). Die einzelnen Datenpunkte liegen als separate .txt Files vor (pro Datenpunkt eine Datei) und sind mit den im Bundesmeldenetz hinterlegten Koordinaten im Gauß-Krüger-System verortet. Dadurch, dass alle Textdateien dieselbe Struktur aufweisen, ist der Aufwand

zum Einlesen und Einspielen der relevanten Daten in eine Datenbank überschaubar. Außerdem ist es möglich die Koordinaten vor dem Speichern mit einem GIS-Tool in ein beliebiges Koordinatenformat zu konvertieren. Damit wird ein optimaler Austausch mit der jeweiligen API (Application Programming Interface) gewährleistet.

Die digitale eBod-Karte zeigt die Bodenverhältnisse in 219 Kartierungsbereichen, insbesondere den Bodentyp, den Grundwasserstand, die Gründigkeit und die Durchlässigkeit. Der Fokus liegt auf Agrar-Böden, somit ist jedenfalls eine Verschneidung mit weiteren Daten notwendig (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald Naturgefahren und Landschaft 2021). Die gesamte Karte liegt bereits als gesammelte Datei aller Datenpunkte vor und kann z.B. als .csv File inkl. Koordinaten in einem beliebigen Koordinatensystem exportiert werden. Die .csv Datei kann anschließend in das System eingelesen und die relevanten Daten gespeichert werden. Wenn Nutzer*innen über das User-Interface die Adresse des Projektstandorts eingeben, wird über eine API wie Google Maps oder Open Streetmap eine Abfrage getätigt. Dabei werden die Koordinaten des Standortes erfasst und im letzten Schritt über eine Datenbankabfrage den relevanten Bodendaten zugeordnet.

Bei der eBod- und ehyd-Karte wird eine Datenbankabfrage getätigt, um den nächstgelegenen Datenpunkt (oder den Mittelwert der vier nächsten Datenpunkte) zu ermitteln. Wie die genaue Berechnung bzw. Zuordnung der eingegebenen Adresse zu den einzelnen Datenpunkten, sowohl bei der eHyd als auch bei der eBod, genau erfolgen soll damit es den größten Kund*innennutzen bringt, muss in weiterer Folge noch ergründet werden.

2.3.2 BIM-Kompatibilität

Um die erstellte RW-Database in BIM zu integrieren, wurde eine Möglichkeit identifiziert, ein IFC File um eigene Parameter zu erweitern. Im konkreten Anwendungsfall sollen zusätzlich zu den Standardparametern eines Bauteils, regenwasserspezifische Eigenschaften wie beispielsweise die Filterwirkung oder die Infiltration angezeigt werden. Im Zuge des Projekts wurde bestätigt, dass dies mit Hilfe von Property Sets realisiert werden kann. Außerdem wurde versucht, diese benutzerdefinierten Eigenschaften eines Bauteils in einer Datenbank abzubilden und eine Möglichkeit zu finden, diese Daten wieder anzuzeigen und zu exportieren.

3. BEST-PRACTICE-MODELLE FÜR DIE REGENWASSER-TOOLBOX

Durch eine Nutzungsgruppenbefragung erfolgt die Auswahl der für den/die Interessent*in passenden Regenwassermanagementmaßnahme. Zurzeit erfolgt diese Befragung in Form einer Umfrage, da es sich dabei lediglich um eine Beta Version handelt, die im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes durch eine Vielzahl weiterer Parameter ergänzt und interaktiv gestaltet werden soll. Durch die Verknüpfung der Schnittstellen können dann nutzungs- und standortspezifischere Empfehlungen getätigt und auf Appbasis verfügbar gemacht werden.

Zuerst werden allgemeine Parameter wie die Lage (städtisch oder ländlich), die Verortung (Boden im privaten Raum, Boden im öffentlichen Raum, Fassade oder Dach) und die Intention (Versickerung vor Ort oder aktive Nutzung des Regenwassers) zur Installation der Maßnahme abgefragt. In Tab. 2 werden die zurzeit berücksichtigten Parameterkategorien dargestellt.

Tab. 2: Auswahl der in der RW-Database vorhandenen Parameterkategorien, gegliedert nach Versickerungsanlage, Fassaden- und Dachbegrünung

Versickerungsanlage	Fassadenbegrünung	Dachbegrünung
Kanalanschluss	Art des Gebäudes	Art des Gebäudes
Verschmutzungsgrad	Tragfähigkeit	Tragfähigkeit
Optische Vorstellungen	Beschaffenheit der (Fläche vor) der Fassade	Nutzungsarten
Vorhandensein oberflächennaher Einbauten	Vorhandensein eines Wasseranschlusses	Ansprüche an Wasserrückhalt
Ansprüche an Wasserrückhalt	Ansprüche an Ausführung	Ansprüche an Ausführung
	Fassadengröße	Dachgröße
Erwartungen an Vegetationsvielfalt	Ansprüche an Kühleffekt	Kombination mit PV- / Solaranlage
Pflegeintensität		Pflegeintensität
Kosten, Errichtungsdauer		Kosten

Damit Interessierte einen ersten Einblick über ausgewählte Maßnahmen, die in der RW-Toolbox vorhanden sind, bekommen, werden diese anhand kompakter Factsheets vorgestellt (siehe Abb. 2).




Dachbegrünung

Schrägdachbegrünung

Auch schräge Dächer können begrünt werden und die Biodiversität am Gebäude steigern. Sie haben einen besonderen optischen Reiz, da sie vom Boden aus häufig gut sichtbar sind. Die Begrünung eines Schrägdaches gestaltet sich je nach Dachneigung komplexer als bei einem flachen Dach.

Üblicherweise muss der Aufbau gegen Abrutschen gesichert werden, es ist auf einen ausreichenden Erosionsschutz zu achten, vor allem am Anfang, wo die Pflanzenwurzeln noch klein sind und wenig Stabilität geben.

Das Regenwasser fließt auf Schrägdächern schneller ab als auf Flachdächern und wird schlechter gespeichert, weshalb der Beitrag zum Regenwassermanagement oft geringer ausfällt als bei Flachdachbegrünungen. Eine Zusatzbewässerung kann erforderlich sein, auch die Pflege ist aufwändiger.

Mit dem richtigen System können auch sehr steile Dächer begrünt werden, eine Kombination mit PV-Modulen ist je nach System möglich.



Regenwassermanagement

Progress bar: 10 segments, 5 filled.

Vegetation

- Moos, Sedum █
- Gräser, Kräuter █
- Stauden, Gehölze █
- Bäume █

Ökologischer Mehrwert

Progress bar: 10 segments, 5 filled.

Vielfalt an und für Pflanzen und Tiere

Sozialer Mehrwert

Progress bar: 10 segments, 5 filled.

Aufenthaltsqualität und Nutzbarkeit

Kosten

Progress bar: 10 segments, 5 filled.

Abb. 2: Beispiel eines Factsheets (Dachbegrünung: Schrägdachbegrünung) aus der RW-Toolbox

Die erfassten Parameter werden dann für die einzelnen Maßnahmen (u.a. Duales System, Rain-garden, bodengebundene Fassadenbegrünung mit Gerüstkletterpflanzen, Naturdach, intensive Dachbegrünung) grafisch aufbereitet. Anhand des Stimmungsbildes und der technischen Skizze werden die Maßnahmen vorstellbar. Im Erklärungstext wird näher auf die Maßnahme eingegangen. Die Veror-

tungsskizze zeigt, wo die Maßnahme installiert werden kann. Die Bewertungsskalen zum Regenwassermanagement, der Vegetation, den Kosten und dem ökologischen sowie sozialen Mehrwert greifen die Daten der RW-Databse wieder auf. Der Parameter „Regenwassermanagement“ beschreibt den Beitrag der jeweiligen Maßnahme für ein nachhaltiges Regenwassermanagement, um so die Spitzenabflüsse während eines Starkregenereignisses durch Versickerung und Speicherung zu minimieren. Beim Parameter „Vegetation“ erfolgt eine Darstellung der Eignung von unterschiedlichen Pflanzengesellschaften für die Maßnahme. Der „Ökologische Mehrwert“ beschreibt die Vielfalt an Pflanzen und Tieren, die durch Anwendung der Maßnahme erzielt werden kann. Der „Soziale Mehrwert“ zeigt die Aufenthaltsqualität und Nutzbarkeit der angewandten Maßnahme auf, während die „Kosten“ die Höhe der Herstellungs- und Erhaltungskosten dokumentieren.

Die Factsheets bilden die Basis für eine grafische Aufarbeitung und individuelle Anpassung anhand von technischen Spezifikationen in der Webanwendung, die dann auf konkrete Projekte und Objekte eingehen können soll.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Im Rahmen dieses Projektes konnten die Vorbereitungen für eine interaktive Webanwendung erfolgreich umgesetzt werden. Bei einer Analyse der internen Schnittstellen konnte eine BIM-Kompatibilität technisch nachgewiesen werden. Ein Einpflegen von Daten digitaler Karten, wie der eBod oder eHyd, ist zur Schaffung nutzungs- und standortspezifischer Ergebnisse technisch ebenfalls möglich. Durch die Berücksichtigung spezifischer Parameter für Versickerungsanlagen, Fassaden- und Dachbegrünungen können die dazu passenden Regenwassermanagementmaßnahmen für Interessierte innerhalb der drei Bereiche empfohlen werden. Factsheets liefern am Ende detailliertere Informationen in kompakter Form zu den jeweiligen Ergebnissen, sodass ein erster Überblick über mögliche Maßnahmen gewonnen werden kann.

Im Rahmen eines weiteren Projektes wird durch die Einreichung eines Demoprojektes eine reale Umsetzung der interaktiven RW-Toolbox und technisch erweiterten BIM-World auf Web-App-Basis angestrebt. Durch diesen ganzheitlichen Ansatz einer einfachen, nutzungsgruppenoptimierten Webanwendung, ergänzt durch maximale Kompatibilität zu BIM, werden die Bedürfnisse nahezu aller potenziellen Stakeholder bestmöglich abgedeckt und eine breite Anwendbarkeit garantiert.

LITERATUR

- Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald Naturgefahren und Landschaft (2021) eBOD-Digitale Bodenkarte. Verfügbar unter: <https://bodenkarte.at/#/center/13.3458,47.7132>.
- Bundesministerium für Landwirtschaft Regionen und Tourismus (2011) eHYD-Hydrographisches Jahrbuch. Verfügbar unter: <https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb/>.
- Dankers R. & Hiederer R. (2008) Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario, JRC Scientific and Technical Reports. EUR 23291 EN. Luxembourg. Verfügbar unter: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR23291EN.pdf.
- Grimm K. (2010) Integratives Regenwassermanagement: Motivenbericht. Wien. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/motivenbericht-textteil.pdf>.
- Luckwald K. & Temmen S. (2017) Einführung und Nutzung von BIM in der Landschaftsarchitektur - Entwicklungspotentiale und Handlungsempfehlungen. Osnabrücke. Hochschule Osnabrück.
- MA 22 (2011) Regenwassermanagement: Rechtliche Grundlagen. Wien, Österreich: Magistrat der Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung.
- Moss J.L.; Doick K.J.; Smith S. & Shahrestani M. (2019) Influence of evaporative cooling by urban forests on cooling demand in cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, 65–73. doi: 10.1016/j.ufug.2018.07.023.

KONTAKTDATEN:

DI Pia Minixhofer

Peter-Jordan-Straße 82/III

1190 Wien

Email: pia.minixhofer@boku.ac.at

Das Gründach – das bessere Flachdach. Der Beitrag von Gründächern zur Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren

Ch. Vondrus

CV-Consulting e.U., Klosterneuburg, Österreich

St. Erker

Slavonia Baubedarf GmbH, Wien, Österreich

A. Stefenelli

Stauss Perlite GmbH, Sankt Pölten, Österreich

ABSTRACT: Green- and flat roofs create additional living areas in cities and can be used for energy production. Their ecological footprint and sustainability depend on the quality of planning (building physics) high quality workmanship and the use of high quality materials. Even more as the share of wooden single-skin non-aerated roof is rising significant.

The presentation shows the technical requirements on components of green roofs: ecological root membranes, roofing membranes, thermal insulation, substrates and their effect on sustainability and city climate. By long proven and innovative solutions the vulnerability of flat and green roofs can be reduced and its longevity can be increased dramatically.

Based on research results and practical solutions technical standards and developments of the last 30 years are being demonstrated. Due to missing Austrian regulations for ecotoxicological biocides in roof membranes German and Swiss recommendations are cited.

The latest EU Taxonomy of 7.2020 will render a strong impact in planning and construction of flat- and green roofs in Austria. Following aspects determine the quality and sustainability of green roofs:

- Technical quality of components, planning and execution
- Economic aspects
- Effects on water balance and city climate
- Ecology, recourses, energy efficiency

1. EINLEITUNG

Neben einer dichten Gebäudehülle bieten Flach- und Gründächer zusätzlichen Lebensraum und dienen der Energiegewinnung. Dabei hängt deren Nachhaltigkeit und Nutzungssicherheit von der Qualität der Planung (Bauphysik), der Ausführung (Handwerk) und der **Qualität der Komponenten** ab. Dies gilt umso mehr, bei steigendem Anteil von Warmdächern in Holzbauweise.

Der Vortrag behandelt die technischen Anforderungen an einzelne Komponenten von Flach- und Gründächern: Wasserdichtebene und Rhizomsperre / Wärmedämmung bzw. Gefälledämmung / Pflanzensubstrat und deren **Auswirkung auf die ökologische Nachhaltigkeit und Resilienz von Gebäuden und Quartieren**. Durch erprobte und innovative Lösungen können potentielle Schwachstellen von Flach- und Gründächern ausgeglichen und deren **Standzeiten deutlich erhöht** werden.

Anhand von Forschungsergebnissen und praktischen Beispielen werden Normen und die technische Entwicklung verfügbarer Materialien der letzten 30 Jahren mit Bezug auf Haltbarkeit, Wasser- und Naturschutz dokumentiert. Da **Biozid Einträge** nach vielen Jahren noch im Erdreich nachgewiesen werden können, werden Deutsche und Schweizer Empfehlungen vorgestellt.

Eine wichtige Rolle für die **zukünftige Bauqualität von Flachdächern** und deren ökologische Bewertung spielt auch die neue **EU-Taxonomie Verordnung** von 7.2020 zur Dokumentation von nachhaltigen Investments. Folgende 4 Themenbereiche bestimmen die Qualität und die Wirkung von nachhaltigen Gründächer:

- Technische Qualität der Komponenten, der Ausführung und der Planung
- Ökonomische Aspekte
- Wirkung von Gründächer auf den Wasserhaushalt und das Stadtklima
- Ökologie, Ressourcen, Energieeffizienz

2. TECHNISCHE QUALITÄT DER KOMPONENTEN, AUSFÜHRUNG, UND PLANUNG

Die einzelnen Komponenten von Flach- und Gründächer leisten einen wichtigen Beitrag zu nachhaltigen und gesunden Lebensräumen:

2.1 DACHABDICHTUNGSBAHNEN:

Bestimmend für die Lebenszyklusbetrachtungen ist die Haltbarkeit der Dichtebenen auf Beton, Holz und Dämmstoffen. Diese hängt von der fachgerechten Verarbeitung und besonders von bestimmten Qualitätsfaktoren ab: Hagelbeständigkeit (Widerstandsklasse HW 5 gemäß VKF), Wärmestandfestigkeit ($\geq +140\text{ °C}$), UV-Beständigkeit ohne Oberflächenschutz ≥ 10 Jahre, Dimensionsstabilität $\leq 0,15\%$. Die ÖNORM B 3660 von 2018 stellt dabei aber geringere Ansprüche an die Zugfestigkeit und Dimensionsstabilität (0,6 %) gegenüber den früheren Normen B 3657 von 1988 mit 0,2 %. Dies kann zu mehr Problemen bei Einbindungen von Attika und Gullys führen. Siehe Abb. 1 und Abb. 2.

	E-KV (Elastomerbitumen)		P-KV (Plastomerbitumen)	
	2018	1988	2018	1988
Anforderungen:	2018	1988	2018	1988
Kälteflexibilität	-15°C	-20°C	-5°C	-10°C
nach Alterung	-10°C	-15°C	± 0°C	-5°C
Zugfestigkeit längs/quer	700 N	800 N	700 N	800 N
Maßhaltigkeit/ Dimensionsstabilität	-0,6%	-0,2%	-0,6%	-0,2%

*) 2018: Keine Änderung dieser Parameter in der Überarbeitung der ÖNORM B 3660 vom 1.11.2009

Abb. 1: Vergleich ÖNORM B 3660 (2018) und B 3658 (1988) (Slavonia GmbH 2019)



Abb. 2: Produktionsbedingter Schrumpfung lt. ÖNORM B 3660, -0,6 % (Slavonia GmbH 2019)

Normen stellen dabei eine „Mindestanforderung“ dar. Für höhere Ansprüche stehen Produkte mit Bautechnischer Zulassung des OIB zur Verfügung. Diese ermöglichen:

- langfristige Bewitterbarkeit und UV-Beständigkeit – ohne Schieferschuppen, Farbe oder Oberflächenschutz wie Beschotterung – dadurch können hohe Belastungen für die Baukonstruktion eingespart werden.
- Altersbeständigkeit von über 30 Jahren und mehr
- dimensionsstabil und extrem robust
- geprüft hagelsicher mit dem Original-Eiskugelttest (nicht nur mit Kunststoffkugeln)

2.2 QUALITÄTANFORDERUNGEN

Um frühzeitige Schäden zu vermeiden, empfiehlt es sich zumindest die Qualitätsanforderungen der alten, strengeren Norm B 3657 von 1988 einzuhalten!

- **Umweltfreundliche Rhizosperrern:** Vermeidung von Bioziden in Wurzelschutzfolien. Dichtbahnen mit mechanischem und ohne chemischen Wurzelschutz schützen die Umwelt und Gewässer. Wie z.B. ISOFLAMM® EXSTRONG wf 5 der Fa. Slavonia Baubedarf GmbH.
- **Wärmedämmung / Gefälledämmung:** Der Einsatz von mineralischen Materialien (expandierte Spezialperlite, wie bspw. Agroperl von Europerl bietet folgende Vorteile: geringe Schadensanfälligkeit, Brandschutz, Wasser unempfindlich, einfache Rücktrocknung, keine Schrumpfung, Vermeidung von Hohlräumen, langfristige Haltbarkeit.
- **Gründach Substrate:** Folgende Anforderungen müssen nachhaltige Gründach Substrate gestellt werden: robuste Bepflanzung, geringes Gewicht, unterschiedliche Aufbauhöhen, hohe Wasserretention und Verdunstungsleistung zur Stadtkühlung mit einem Abflussbeiwert von $\leq 0,1$, hohe Biodiversität, Integration in Wasserplanung von Freiflächen, zusätzliche Wärme- und Schalldämmung, Bemessung auf 30 jähriges Hochwasser

3. ÖKONOMISCHE ASPEKTE

Folgende ökonomischen Aspekte unterstützen den Einsatz von Gebäude Begrünungen:

- **EU Taxonomie:** ökologisch ausgeführte Gründächer unterstützen die Zielsetzung der neuen EU Taxonomie durch die Schaffung von zusätzlichen hochwertigen Lebensraum, Schutz des Stadtklimas und Vermeidung von Versiegelungen, Biodiversität.
- **Hohe Standzeiten** durch den Schutz der Dichtungsebenen
- **Materialeinsparungen** durch bessere Materialqualitäten Hagelbeständigkeit, Hitze-, UV Beständigkeit, Dimensionsstabilität (2-lagige anstelle von 3-lagigen Dichtungsebenen bei intensiver Begrünung mit bautechnischer Zulassung), Ersatz der Kiesauflast (20 cm Dachaufbau nach dem System DrainGarden entsprechen 8 cm Kiesauflast)
- **Einsparung bei künstlicher Bewässerung** durch höchste Wasserretention eingesetzter Substrate, bei richtiger Bemessung ist nur eine Anwuchsbewässerung erforderlich und danach nicht mehr.

Wasserspeicherung bei 20 °C 50 - 60 % relative Luftfeuchtigkeit		
Schichtstärke	4 cm	10 cm
Materialbedarf unverdichtet*	40 l/m ²	100 l/m ²
Wasserreservoir	20 l/m ²	50 l/m ²
Verdunstungszeit	816 Std.	3.480 Std.
	34 Tage	145 Tage

Abb. 3: Wasserspeicherung (BWA 1989)

- **Einsparungen bei Kanalbau, Zisternen und bei Kanalbenutzung** durch geringen Abflussbeiwert und hoher Wasserretention in Dach und Grünflächen (50 Volumsprozent, direkt im Kern des Zuschlagstoffes Agroperl. Dadurch können Aufwendungen für teure Einbauten aus Plastik, Beton oder Stahl reduziert werden.

4. WIRKUNG AUF WASSERHAUSHALT UND STADTKLIMA

Die Wirkung auf Wasserhaushalt und Stadtklima sind vielfältig und detailliert in Reinwald et al. (2018) beschrieben:

- Speicherung von Regenwasser für die Versorgung der Vegetation, Retention von Niederschlagswasser bis zu 130 l / m² Stunden bei 30 cm Aufbauhöhe
- Vermeidung von Überflutungen und Entlastung des Kanalnetzes durch schnelle Wasseraufnahme, Verzögerung des Ablaufes in jedem Fall um mehrere Stunden
- Kühlung und Hitzeschutz durch Evapotranspiration: heizt das Stadtklima mit bis zu 218 W/m² weniger Energie auf
- Klimaverbesserung durch Beschattung und Verdunstung (bis 2 l/m² pro Tag)
- Außenoberflächen um über 30 °C kühler
- bleibt im Innern um bis ca. 8 °C kühler
- reduziert die Temperatur des ausströmenden Luftkörpers um 10 %
- Schallschutz um bis zu 10 dB
- Wärmedämmung
- Hochwertiger Lebensraum in der Stadt
- Verbesserung der Luftqualität

- Regenwasser Rückhalt
- Biodiversität im urbanen Raum
- Psychologische und physiologische Aufwertung des Lebensraumes Stadt

5. ÖKOLOGIE, RESSOURCEN, ENERGIE

Die positiven Einflüsse auf Ökologie, Ressourcen und Energie können auch in der Gebäudezertifizierung angesetzt werden:

- Einsatz von Biozid freiem Wurzelschutzfolien – keine Belastung von Grundwasser, Boden, Vegetation, z.B. Isoflam Extrastrong wf5 (KURAS 2015 / UVEK 2017)
- Lebensraum für Flora & Fauna mit hoher Artenvielfalt
- O₂ Produktion
- Filterwirkung
- Überflutungsschutz durch hohe Wasserretentionswirkung direkt im Substrat
- Einsparung von Trinkwasser zur Bewässerung
- Unterschiedliche Nutzung der Grünflächen
- Einsatz von mineralischen, wiederverwendbaren Materialien
- Rechenbare Ausgleichsflächen für Rodungen und Versiegelungen
- Bewertung durch Gebäudezertifizierungen (ÖGNI, KlimaAktiv, ÖGNB, Greenbuilding)
- Verbesserung der PV Effizienz durch Kühlung
- Wärmedämmende Wirkung (ÖNORM in Bearbeitung)

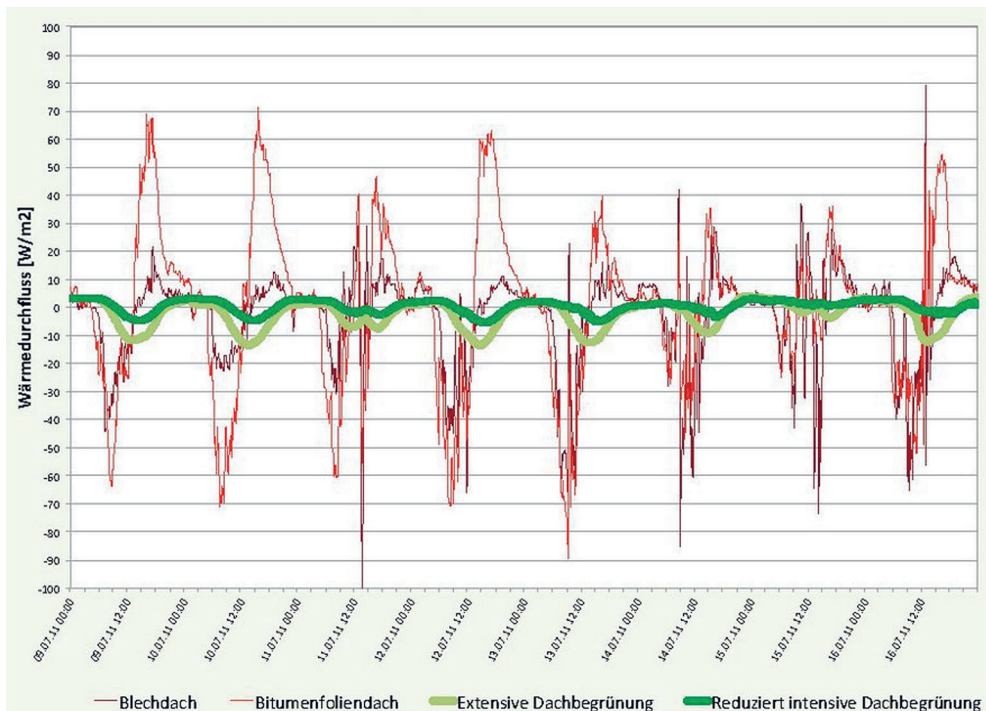


Abb. 4: Wärmedurchfluss von begrüntem und unbegrüntem Dachabdeckungen (GrünStadtKlima 2014)

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Nutzergerecht geplante und ausgeführte Gründächer schaffen nicht nur hochwertigen Lebensraum in der Stadt. Durch den Einsatz von leistungsfähigen Materialien (besser als die Norm) können auch **technische, ökonomische und ökologische Ziele erfüllt** werden, und das Stadtklima für Mensch und Natur verbessert werden.



Abb. 5: Beispiel Dachbegrünung mit robuster Vegetation - Wohnhaus (Stauss Perlite GmbH 2021)



Abb. 6: Beispiel Dachbegrünung mit robuster Vegetation Hallendach (Stauss Perlite GmbH 2018)

LITERATUR

- BAW (1989) Wasserspeicherung von Agroperl der Stauss-Perlite GmbH, Petzenkirchen, Bundesanstalt für Kulturtechnik und Wasserhaushalt
- GrünStadtKlima (2014) Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft“, Leitfaden, Österreichischer Verband für Bauwerksbegrünung, Wien, Seite 14,
- KURAS (2015) Austrag und Rückhalt von Mecoprop durch Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung Stadt Entwicklung Berlin, KURAS https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/modellvorhaben/kuras_dach-biozid_mecoprop.pdf
- ÖNORM B 3660 von 2018, Abdichtungsbahnen - Bitumenbahnen mit Trägereinlage für Dachabdichtungen

- ÖNORM B 3657 von 1988, Abdichtungsbahnen - Polymerbitumenbahnen mit Kunststoffvlieseinlage - Anforderungen
- ÖNORM L 1131, Gartengestaltung und Landschaftsbau – Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung
- Reinwald F., Weichselbaumer R., Liebl U., Brandenburg C., Damyanovic (2018) Green up your City - Fassaden- und Dachbegrünung im geförderten Wohnbau in Wien, Forschungsbericht / BOKU Wien, https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=12195
- Stauss Perlite GmbH (2021) Foto zur Verfügung gestellt von Stauss Perlite GmbH, St. Pölten, Österreich
- UVEK (2017) Information über chemische Durchwurzelungs-schutzmittel in Bitumenbahnen Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, HSR Hochschule für Technik Rapperswil Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik - Stand 2017 https://www.umtec.ch/uploads/tx_hsrpm/171220_BAFU-Information_Mecoprop_in_Bitumen-Dachbahnen_BAFU_final.pdf

KONTAKTDATEN AUTOR(EN):

Stefan Erker
Slavonia Baubedarf GmbH
Hauffgasse 3 – 5
1110 Wien
office@slavonia.com

Mag. Andreas Stefenelli
Stauss Perlite GmbH
Stifterstraße 4,
A-3100 St. Pölten
office@euoperl.at

Mag. Ing. Christian Vondrus
CV-Consulting e. U.
Hauptstraße 49 G
3400 Klosterneuburg
office@gesundbauen.at

Design optimization of a heat distribution during the reconstruction of the DH networks

E. Švarcová, D. Petráš

Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

R. Štefanec

NRG flex s.r.o., Pezinok, Slovakia

ABSTRACT: The case project was the reconstruction of thermal distribution networks for district heating. This project in a built-up area - in the city zone in Eastern Slovakia, had the nature of the required exchange of thermal divorces. The study contains two parts of the assessment of the distribution of heating water and the assessment of the design for hot water distribution. Comparison of the number of joints on the route and total thermal losses in newly designed pipes over the original proposal. The modernization of the distribution pipes will significantly increase the efficiency of the thermal network, the finance to operate shall be reduced. Thanks to the correct design for a particular project, we can reduce heat losses in heating pipes from 26–46 % compared to the originally designed pipes. Thermal losses for the distribution of hot water are reduced by 23–43 % over the original proposal.

1. INTRODUCTION

As a challenge for this study, we decided to assess and evaluate the possibilities of how to implement the real project through various pipelines. To what extent it is possible to optimize the heat distribution replacement proposal, as proposed in the tender.

For external heat distribution of central heating, it was required to use new steel pipes in ductless pre-insulated design. Pre-insulated steel pipes were to be in the highest insulation class 3. For comparison, we selected all three grades of pre-insulated steel pipes steel in series 1, 2, and 3 and compared them with plastic pre-insulated pipes.

New polypropylene pipes were required for external hot water distribution in ductless pre-insulated design. The pre-insulated pipe should be in insulation class 2. For comparison for hot water, we made an assessment of the pipeline from polypropylene pipes in series 1, 2 and 3 and we compared them with flexible pre-insulated plastic pipes.

2. PARAMETERS OF THE NEW DISTRIBUTION NETWORK

According to the set project documentation Reconstruction of the boiler rooms from company NRG flex (2019), the proposed parameters were determined:

Calculated temperatures and pressures - heat pipes

Calculated temperature of the central heating supply: $T_p = 80\text{ °C}$

Calculated return temperature of central heating: $T_s = 60\text{ °C}$

Temperature difference: $\Delta T = 20\text{ °C}$

Design pressure of the central heating distribution: PN 10, 1.0 MPa

Calculated hot water supply temperature: $T_p = 60\text{ °C}$

Design pressure of hot water distribution: PN 10, 1.0 MPa

3. MAIN COMPARISONS OF THE HEAT DISTRIBUTION

The study of this project was intended to assess different alternatives, to show what possibilities are offered for this particular type of project and operation with real values.

3.1 THE DISTRIBUTION OF HOT WATER

Each heat pipe has different operating conditions, heat transfer medium temperature, operating pressure and flow rates. It is necessary to choose the right type of piping to provide the operator with an efficient and economically acceptable solution. The following section shows the differences in the thickness of the diameters of various pipelines and the associated relationship with the change of dimensions in Tab. 1.

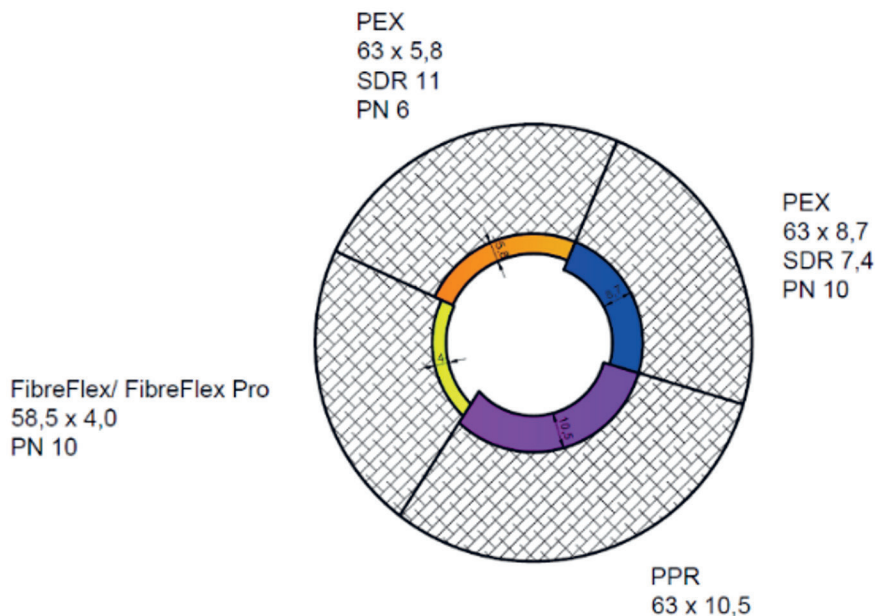


Fig. 1: Pipe cross section for different types of pipes (based on Data by Radius Kelit 2020)

As we can see from the pipe cross-section graph, when replacing systems with the same nominal outer diameter, the clearance of the pipeline differs significantly. When designing the pipeline, it is necessary to realize that the original distribution network may have a different dimension than is needed for the new distribution, so it is necessary to make a new design according to the choice of the pipeline. Which pipeline we choose therefore has a great impact on the overall distribution network. It is necessary to take this important fact into account because it affects the amount of flow in the pipeline, and thus also affects the total pressure in the pipeline.

It can be seen from the example of Fig. 1 that the internal clearance in different pipes is different, thus changing the flow in the pipe networks. Tab. 1 shows the actual inside diameters plastic pipes and or polypropylene pipes. Because flexible plastic pipes have a smaller wall thickness for the medium, we can reduce the clearance by one dimension from the original design of the dimensions for the PPR pipe rods in the design by using the flexible plastic pipe. This preserves the internal cross-section and flow in the pipes and does not change the pressure ratios according to the calculation and regulation of the network.

Tab. 1: Internal pipe clearance for plastic pipes and proposed polypropylene pipes (Radius Kelit 2020; NRG flex 2021a)

DIMENSION	PLASTIC PIPES	PPR
d25	20,6	16,6
d32	27,0	21,2
d40	34,4	26,6
d50	40,4	33,4
d63	50,5	42,0
d75	60,3	50,0
d90	72,0	60,0
d110	88,0	73,4

Tab. 2 provides an overview of dimensions for PPR pipes in three series of insulation in the proposed dimension from the project and for flexible plastic pre-insulated pipes optimized dimensions. We can compare total pipe losses in the heat distribution for hot water, where the less pipe loss is in the pipes which are made from plastic material. The next difference is in the number of pipe joints, where the number of pipe joints in plastic pipes are multiple times less than the pipe joints in PPR pipes.

3.2 THE DISTRIBUTION OF HEAT WATER

Another part of the assessment is the total heat loss per meter of the route. The following graph (Fig. 2) shows the course of heat loss per meter of route for the corresponding dimension of the individual piping systems of steel and plastic pre-insulated piping.

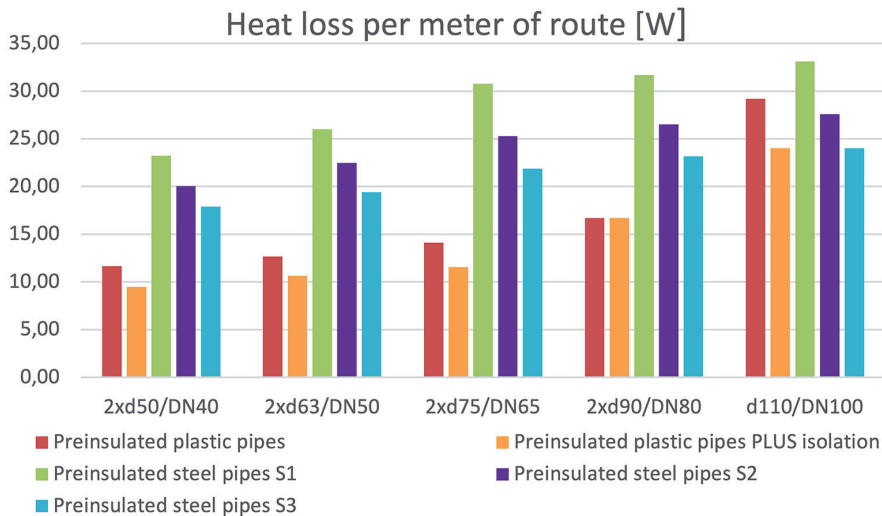


Fig. 2: Losses per meter for plastic pipes and steel pipes in series 1, 2, 3 (based on Data by Radius Kelit 2020a)

Tab. 2: Overview of alternative pipes for hot water distribution (based on Radius Kelit 2020; NRG flex 2021a)

PIPE DIMENSION	ROUTE	NUMBER OF PIPE JOINTS	PPR S1		PPR S2		PPR S3		PIPE DIMENSION	ROUTE	NUMBER OF PIPE JOINTS	PLASTIC PIPES		PLASTIC PIPES PLUS ISOLATION	
			TOTAL PIPE HEAT LOSSES [kW]	PIPE HEAT LOSSES [kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES [kW]	PIPE HEAT LOSSES [kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES [kW]	PIPE HEAT LOSSES [kW]				TOTAL PIPE HEAT LOSSES [kW]	PIPE HEAT LOSSES [kW]		
d25	792								d25	792		5,37	4,62		
d32	795		7,70	6,37	5,70				d32	795		6,84	5,67		
d40	863		7,82	6,87	6,20				d40	863		7,73	6,28		
d50	863		10,98	9,32	8,23				d50	638	339	5,52	4,84		
d63	638	1103	9,26	7,89	6,69				d63	834		7,89	6,89		
d75	834		13,26	10,81	9,26				d75	393		3,96	3,40		
d90	393		6,72	5,52	4,79				d90	581		6,32	5,45		
d110	581		9,48	7,88	6,87										
			65,22	54,66	47,74							43,63	37,15		

Tab. 3 lists important data comparing steel in series 1, 2, and 3, which is the insulation class of steel pipe, where series 3 is the series with the largest insulation thickness and next to it is a table with flexible plastic pre-insulated pipe and plus insulation in a two-pipe system.

The tables show a comparison of total losses on the route in the distribution system for central heating, but also a large difference in the ratio of the number of connections compared to plastic pipes. Welded joints for steel pipes are necessary every 12 m, but for plastic ones, they can be reduced to these pairs of joints, thanks to the windings on the disc in the required lengths. There are up to 80 % fewer connections for the optimized part of the heating distribution and 70 % fewer connections for hot water distribution (for connections, each connection on the route, on elbows, and branches is calculated for objective comparison). The installation time and the width of the excavations for plastic pipes show a very suitable alternative when replacing old wiring.

3.3 CALCULATION OF SAVINGS IN THE DESIGN OPTIMIZATION AND TECHNICAL SOLUTION

Central heating: Design of plastic pipes compared to the implementation in steel pipes

	Loss %	Loss kW	Annual savings
Savings compared to S1 steel:	-46 %	-44,8 kW	852 GJ·a ⁻¹
Savings compared to S2 steel:	-36%	-29,1 kW	553 GJ·a ⁻¹
Savings compared to S3* steel:	-26%	-18,6 kW	354 GJ·a ⁻¹

We considered a heating season of 220 days a year and 24 hours of operation.

Hot water: Design of plastic pipes compared to the implementation in PPR pipes

	Loss %	Loss kW	Annual savings
Savings compared to S1 steel:	-43 %	-28,1 kW	886 GJ·a ⁻¹
Savings compared to S2 steel:	-32 %	-17,5 kW	551 GJ·a ⁻¹
Savings compared to S3* steel:	-23 %	-10,6 kW	334 GJ·a ⁻¹

We considered heating for hot water 365 days a year and operating 24 hours.

* data for a specific assignment of the compared project

Tab. 3 Overview of piping alternatives for heating distribution (based on Radius Kelit 2020; NRG flex 2021b; Ecoline 2021)

PIPE DIMENSION	ROUTE	NUMBER OF PIPE JOINTS	STEEL S1		STEEL S2		STEEL S3		PLASTIC PIPES		PLASTIC PIPES PLUS ISOLATION	
			TOTAL PIPE HEAT LOSSES	[kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES	[kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES	[kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES	[kW]	TOTAL PIPE HEAT LOSSES	[kW]
DN [mm]	[m]	[pc]	[kW]	[m]	[kW]	[m]	[kW]	[m]	[pc]	[kW]	[m]	[kW]
DN200	312	74	7,79		5,98		4,84					
DN150	732	142	16,82		13,29		10,90					
DN125	1362	314	26,26		21,73		18,35					
DN100	1506	338	24,93		20,77		18,08	1 506	165	25,49	1 506	19,79
DN80	1002	238	15,88		13,28		11,61	501	56	8,27	501	8,27
DN65	1884	380	28,98		23,83		20,61	942	45	13,28	942	10,91
DN50	1344	296	17,47		15,11		13,05	672	18	8,51	672	8,51
DN40	852	176	9,89		8,54		7,62	426	4	4,96	426	4,96
COMPLETE PROJECT		1958	148,02		122,53		105,06					
OPTIMISED PART		1428	97,15		81,53		70,97	OPTIMISED PART	288	60,44	OPTIMISED PART	52,44

4. CONCLUSION

As was mentioned above, we wanted to compare the possibilities of replacing the pipeline during the reconstruction and show how to optimize the overall distribution network. This four-pipe system, originally designed for central heating entirely in steel and hot water in PPR pipes, with the materials available on the market today, we would propose to convert to a hybrid solution for steel a combination of flexible pipes up to DN100 and higher dimensions in steel rods and for hot water complete to plastic flexible pipes.

There are several such optimized distributions, whereby changing to a hybrid solution it was possible to implement distributions faster, with less impact on the environment and especially more efficient from an operational point of view, which is a real investment in the future.

ACKNOWLEDGEMENT

In addition to the study, I work in a Slovak company, with which I had the opportunity to make calculations and comparisons and in cooperation with the manager Ing. Štefanec and in cooperation with the Slovak University of Technology in Bratislava we wrote a contribution from our assessment. I would like to thank the manager of company *NRG flex* Ing. Štefanec, my supervisor prof. Ing. Petráš PhD., and prof. Ing. Ján Takács, PhD. for helping and leading this contribution.

REFERENCES

- Ecoline (2021) catalog Pre-insulated steel pipes, <https://www.ecoline.it/wp-content/uploads/2021/04/pipes.pdf>
- NRG flex (2021a) Flexibilné predizolované potrubia, NRG flex, s.r.o., Slovenská republika <https://www.nrgflex.sk/flexibilne-predizolovane-potrubia/>
- NRG flex (2021b) Ocel'ové predizolované potrubia, NRG flex, s.r.o., Slovenská republika <https://www.nrgflex.sk/ocelove-predizolovane-potrubia/>
- NRG flex (2019) NRG flex company project documentation: RECONSTRUCTION OF BOILER ROOMS, Construction designer: ERGA s.r.o., design study
- Radius Kelit (2020) catalog Pre-insulated, flexible pipe systems technical product overview, https://www.radius-kelit.com/wp-content/uploads/2020/11/Produktkatalog2020FLEX_EN_compressed.pdf

CONTACT:

Ing. Eva Švarcová
Slovak University of Technology
Radlinského 2766/11,
810 05 Staré Mesto
Email: eva.svarcova@stuba.sk

Prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.
Slovak University of Technology
Radlinského 2766/11,
810 05 Staré Mesto
Email: dusan.petras@stuba.sk

Ing. Robert Štefanec
NRG flex s.r.o
Moyzesova 2/B,
902 01 Pezinok
Email: stefanec@nrgflex.sk

Partizipative und nachhaltige Entwicklung eines Regelwohnbaus

R. Höfler, A. M. Fulterer

AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich

T. Brown, W. Schwarz, C. Platzer

schwarz.platzer architekten, Graz, Österreich

H. Überbacher, M. Jankovic

WEGRAZ, Graz, Österreich

B. Hammerl, E. Oswald, H. Schnitzer, F. Turek

StadtLABOR, Graz, Österreich

ABSTRACT: From the developers' point of view, the focus in residential construction is on the highest possible utilization of building density, cost efficiency targets and short planning and construction times. A participatory approach in the sense of smart city goals or in the sense of innovations for ecologically and socially sustainable coexistence is not usually the focus of project developments. Demand-oriented co-design or development of housing typologies is usually not possible. In contrast, building group projects make very high demands on participatory planning and building, but due to time and financial resources, they have so far only been reserved for a relatively small circle of users.

The aim of "Wir & Co" is to develop climate-friendly apartments in a participatory planning process and with a new type of sales strategy. The experience gained from building group projects is incorporated into the project development.

Future residents are recruited at an early stage for demand-oriented development in the rental and ownership sectors after thorough target group research. Common site inspections, discussions and surveys form the basis for mutual workshops and in-depth planning steps.

Aspects of affordability in terms of material use, energy supply, building services and self-build phases are integrated into the planning process. Using the jointly planned residential project as an example, energy sufficiency and the overarching goal of a holistic CO₂ reduction are pursued.

The visible result at the end of the project is a pilot residential building "Wir & Co" in Eggersdorf bei Graz, which is expected to go far beyond the "state of the art" in standard residential construction due to an open, networked and participatory development, planning and sales process, both in terms of the quality of the content of the project as well as the quality of the processes and the satisfaction of the residents.

Based on an accompanying evaluation and economic analysis, a guideline for participatory development, planning and implementation will be created. The question of the extent to which cooperative planning processes can be established in regular housing construction will be explored. The learning experiences are to be multiplied for future projects in regular housing construction.

1. EINLEITUNG

Die Entwicklung von Wohnraum in Österreich basiert auf unterschiedlichsten Rahmenbedingungen und Planungsparametern. Gemeinnützige Wohnbaugenossenschaften wie auch private Bauträgersgesellschaften lassen sich in vielen Facetten entlang der Planungs- und Umsetzungsachse von Baugruppenprojekten unterscheiden.

Im Siedlungswohnbau zählen ein möglichst maximales Ausnutzen von Bebauungsdichten, Kosteneffizienzzielen sowie schnelle Planungs- und Errichtungszeiträume zu den Schwerpunkten der Entwicklerperspektive. Dem Grundstückskauf folgt die Planungs- und Umsetzungsphase. Die Zielgruppe

der BewohnerInnen wird aufgrund von Marktfaktoren definiert und erst nach Abschluss der Planungs- und Umsetzungsphase werden der Vertrieb gestartet und die BewohnerInnen für das Projekt gewonnen. Eine partizipative Herangehensweise im Sinne der Smart City Ziele, wie sie beispielsweise in Wien definiert wurden (Homeier 2019), oder im Sinne von Innovationen für ein ökologisch und sozial nachhaltiges Zusammenleben, stehen oftmals nicht im Fokus von Projektentwicklungen. Die BewohnerInnen lernen sich meist erst beim Bezug des Gebäudes kennen. Eine Mitgestaltung oder bedarfsgerechte Entwicklung von Wohntypologien wird in der Regel nicht ermöglicht.

In Europa entstehen seit etwa 15 Jahren viele gemeinschaftliche Wohnprojekte. Der Hauptgrund ist oft die Schaffung von leistbarem Wohnraum - das Ziel, ein Projekt unter dem üblichen Marktpreis zu entwickeln. Ein erweitertes Angebot zum individuellen Wohnraum (gemeinschaftliche Nutzungen) wird ebenfalls mitgedacht und angestrebt, wobei auch hier das Teilen (Sharing Economy) teils einen nachhaltigen, teils einen vorrangig ökonomischen Hintergrund hat. Aktuell erfährt diese Art der Projektentwicklung eine Renaissance; in Wien werden beispielsweise Baufelder in der Seestadt Aspern oder im Sonnwendviertel explizit für Baugruppenprojekte vorgesehen. Die Grundstücke werden über Wettbewerbsverfahren vergeben und eine sich vorab formierte Baugruppe bekommt den Zuschlag. Baugruppen werden so vermehrt als strategisches Instrument in großen Stadtteilentwicklungsgebiete eingesetzt. Menschen mit einem hohen Anspruch an gemeinschaftlichen Raumangeboten und Aktivitäten, einem Interesse an demokratischen Ausverhandlungsprozessen, einer hohen Wohnzufriedenheit und Identifikation mit dem Ort und Kompetenz in Selbstorganisation wirken positiv auf das Gebäude und das Wohnumfeld.

Im Regelwohnbau werden vermehrt Gemeinschaftsflächen geschaffen, um der Nachfrage nach einem erweiterten Wohnraum gerecht zu werden. Partizipative Prozesse werden hier derzeit noch nicht ermöglicht. Das gängige Entwicklungs-, Umsetzungs- und Vertriebskonzept erlaubt es dem Bauträger nicht, sehr früh mit den NutzerInnen in Kontakt zu treten.

Das laufende Bauprojekt „Wir & Co WOHNEN WIE WIR WOLLEN“ hat es sich daher als Ziel gesetzt, in einem innovativen Prozess die Praxistauglichkeit eines partizipativen Planungsparadigmas sowie die Umsetzung einer ökologisch wie auch wirtschaftlich nachhaltigen Bauweise für den Regelwohnbau zu demonstrieren.

2. PARTIZIPATIVER WOHNBAU IN EGGERSDORF BEI GRAZ

Auf einem ca. 6.000 m² großen Grundstück in Eggersdorf bei Graz werden derzeit 33 Wohneinheiten entwickelt und umgesetzt. Zukünftige BewohnerInnen wurden, nach eingehender Zielgruppenrecherche, frühzeitig für eine bedarfsgerechte Entwicklung im Miet- und Eigentumssektor gewonnen. Bei der ersten Bedarfserhebung konnte erhoben werden, dass ein Interesse an Mietwohnungen besteht. Ziel des Projektteams ist es hierbei zumindest die Hälfte der zukünftigen BewohnerInnen im Zuge der Vorentwurfsphase für das Wohnprojekt zu gewinnen. Weitere InteressentInnen können jederzeit einsteigen und es werden über den gesamten Projektzeitraum Mitgestaltungsmöglichkeiten angeboten. Diese unterscheiden sich in den Themenstellungen und im Grad der Vertiefung voneinander.

Mit Hilfe der folgenden Schritte wurden erste Vorkehrungen getroffen um Interessierte bestmöglich adressieren zu können:

- In einer ersten Analysephase wurden Ergebnisse aus relevante Vorprojekten gescreent und um weitere Analysen ergänzt.
- Es wurde eine Zielgruppenrecherche anhand aktueller Trends (Wohntrends, Bevölkerungswanderungen (Land/Stadt, Stadt/Land)) und auf Basis von Gesprächen mit der Gemeinde und weiteren lokalen Stakeholdern erstellt.
- Zudem wurde ein „Working Paper“ zu Potenzialen und Zielgruppen erstellt. Konkrete Kernaussagen und Handlungsempfehlungen sind darin zusammengefasst. Diese wurden anschließend diskutiert und festgelegt und dienen als Basis für die weitere Projektplanung und -umsetzung.

In einer weitergehenden Analysephase waren Interviews von Seiten des Projektteams geplant, die - bedingt durch den Lock Down im März 2020 - in abweichender Form durchgeführt werden mussten: VertreterInnen der Gemeinde Eggersdorf, Privatpersonen, UnternehmerInnen und weitere Stakeholder wurden daher per Telefon über das geplante Bauvorhaben informiert und befragt. Zudem wurde ein Erreichen der zukünftigen BewohnerInnen über Printmedien und mithilfe von Social Media bewerkstelligt.

Um schnell in die Phase des Partizipationsprozesses einsteigen zu können wurden bereits in der frühen Planungsphase Interessierte sowie Nachbarinnen und Nachbarn miteinbezogen. Dies geschah durch:

- Informationsabende
- Begehungen des Grundstücks / des Bauplatzes
- Workshops

Anhand der Möglichkeit der aktiven Mitgestaltung einzelner Interessierter, konnte bereits in der frühen Planungsphase auf Wünsche und konkrete Fragen Bezug genommen werden und die Ergebnisse in die weitere Planung integriert werden.

3. ENERGIEEFFIZIENZ UND NACHHALTIGKEIT

Um eine ökologisch wie auch wirtschaftlich nachhaltige Bauweise vorschlagen zu können, wurden verschiedene Kriterien beleuchtet, auf welche sich das Bauvorhaben beziehen sollte. Besonderer Fokus wurde dabei auf die Klima-Aktiv Kriterien (BMK 2021) sowie auf erweiterte Ziele hinsichtlich Mobilität im Siedlungsraum gelegt.

Zudem ist die Lebenszyklusbetrachtung in diesem Projekt von großer Bedeutung, um die Vorteile nachhaltiger Baustoffe sowie erneuerbarer Energieträger noch hervorzuheben, welche sich oft über den gesamten Lebenszyklus erstrecken. Um einen ersten Eindruck darüber zu erlangen, wie sich verschiedene Bauweisen und Materialien auf den Energieverbrauch und die CO₂ Emissionen des gesamten Quartieres auswirken, wurden Berechnungen mit Hilfe des ELAS-Rechners (Stöglehner 2011) der TU Graz und BOKU Wien durchgeführt. Hierfür wurden drei verschiedene Varianten miteinander verglichen:

- Standardvariante: fossile Dämmung, Nahwärme, keine Photovoltaik-Nutzung
- Ziegelmassivbauweise: ökologische Dämmung, Nahwärme, Photovoltaik-Nutzung (20 kWp)
- Holzleichtbauweise: ökologische Dämmung, Nahwärme, Photovoltaik-Nutzung (20 kWp)

Bei den Berechnungen wurden zwei Möglichkeiten für jedes Szenario betrachtet. Zum einen wurde die siedlungsspezifische Gesamtsituation analysiert und zum anderen wurde das Gebäude als eigenständige Einheit betrachtet (Gebäudespezifisch). Die Ergebnisse der einzelnen Varianten sind in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt.

Aus diesem Variantenvergleich geht hervor, dass eine Holzleichtbauweise mit ökologischer Dämmung hinsichtlich der CO₂ Emissionen anzustreben ist. Diese Variante, gekoppelt mit einer Photovoltaikanlage auf den Dachflächen und einer Nahwärmeversorgung ist aus nachhaltiger und ökonomischer Sicht die zielführendste.

Die Berechnung mit dem ELAS-Rechner zeigt auch, welchen Einfluss nicht nur die Baumaterialien selbst, sondern auch die Mobilität der Bewohner hat. Daher wird im Projekt auch besonderer Wert auf ein nachhaltiges Mobilitätskonzept gelegt.

Um die passende Energieversorgung gewährleisten zu können, erfolgte mit Hilfe einer PHPP-Berechnung (Passivhaus Institut 2021) ein Variantenvergleich. Dazu wurden 208 Varianten durch Kombination von verschiedenen Aspekten (Dämmstandard, Baumaterial, Energieversorgung, Ausrichtung) erstellt und miteinander verglichen.

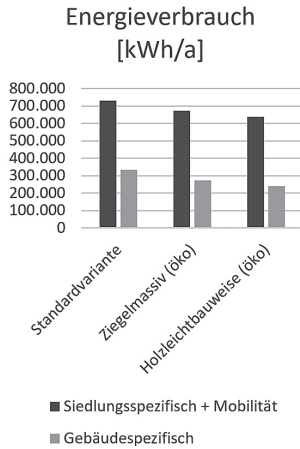


Abb. 1: Energieverbrauch der verschiedenen Varianten

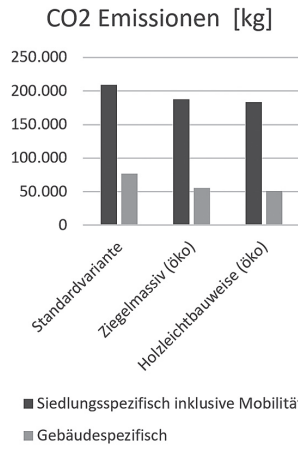


Abb. 2: CO₂ Emissionen der verschiedenen Varianten

In der Abb. 3 sind die verschiedenen Varianten hinsichtlich ihrer CO₂ Bilanz und ihrer Lebenszykluskosten dargestellt. Die Varianten im schwarzen Kreis geben jenen Bereich an, in welchem sich die für dieses Projekt favorisierte Variante befindet. Dazu wurde eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen. Das Diagramm zeigt, dass die Versorgung mit WP über den Lebenszyklus noch eher teuer ist. Die Versorgung mit Gas wäre beim derzeitigen Preisniveau (2020) noch etwas kostengünstiger als Fernwärme, aber nur, weil hierbei keine CO₂ Folgekosten berücksichtigt werden.

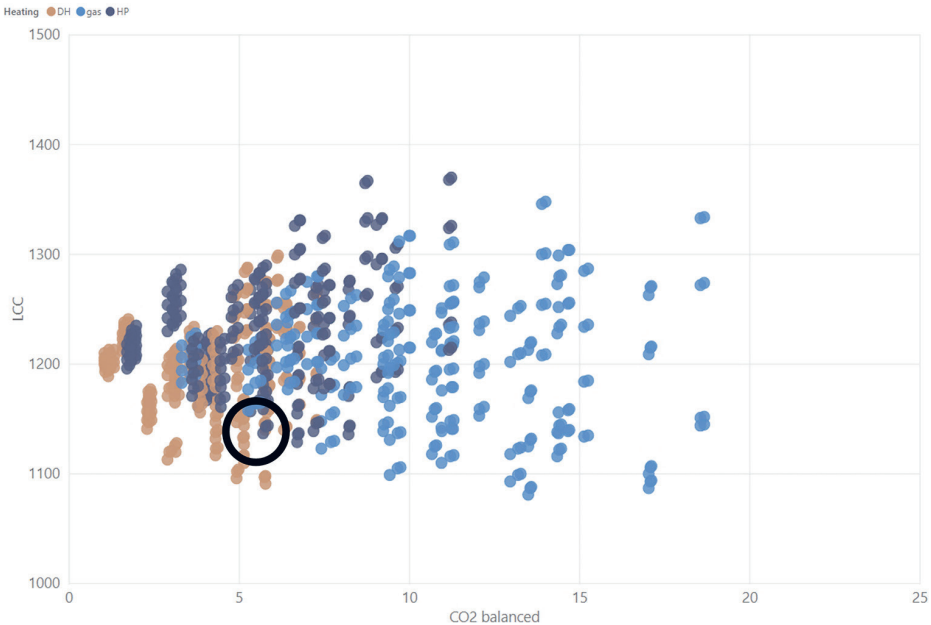


Abb. 3: Ergebnis der Variantenstudie zur CO₂ Bilanz und der Lebenszykluskosten.

Die roten Punkte stellen jene Varianten dar, bei denen mit Nahwärme (DH) versorgt wird. Die dunkelblauen Kreise zeigen an, wie sich die Versorgung mit einer Wärmepumpe auswirkt. Bei Versorgung mit Wärme aus Gas (hellblaue Punkte) sind die Emissionen am höchsten. Bei der Berechnung wurden die durch die CO₂ Emissionen verursachten Folgekosten nicht berücksichtigt.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND GEPLANTE SCHRITTE

Das partizipative Wohnprojekt „Wir & Co WOHNEN WIE WIR WOLLEN“ beschäftigt sich aktiv mit der Möglichkeit einen ökologisch nachhaltigen Wohnbau so zu entwickeln, dass bereits in der Planungsphase zukünftige BewohnerInnen miteingebunden werden. Dies geschieht durch Interviews, Workshops und Fragebögen. Die Aspekte der Nachhaltigkeit, wie beispielsweise regionale Nutzung von Heiz- und Baumaterialien werden anhand von Lebenszyklusanalysen und möglichst regionalen Produkten abgedeckt.

Die bereits erzielten Ergebnisse zeigen auf, dass ein Partizipationsprozess auch im Regelwohnbau erfolgreich implementiert werden kann. Es gibt die Zielgruppe von BewohnerInnen, welche an einem vom Projektteam und Bauräger vorher begrenzten und festgelegten Prozess zur Mitgestaltung beitragen. Im vorliegenden Projekt wurden Interessenten für das entstehende Wohnprojekt schon früh in die Planungsphase integriert, sowie ihre Vorschläge wie auch Bedenken zu Themen wie Selbstausbau und Hochwasserschutz gemeinsam diskutiert und in die Planung aufgenommen.

Als sichtbares Ergebnis soll am Ende des Projekts ein Pilot-Wohnbau errichtet werden, der durch einen offenen, vernetzten und partizipativen Entwicklungs-, Planungs- und Vertriebsprozess sowohl in Bezug auf die inhaltliche Qualität des Projekts als auch in Bezug auf die Qualität der Prozesse und die Zufriedenheit der BewohnerInnen weit über den „state of the art“ im Regelwohnbau hinausgeht.

Auf Basis einer begleitenden Evaluierung und Wirtschaftlichkeitsanalyse wird ein Leitfaden für partizipatives Entwickeln, Planen und Umsetzen erstellt. Dieser wird die Multiplizierbarkeit der Lernerfahrungen für zukünftige Vorhaben im Regelwohnbau ermöglichen.

LITERATUR

- BMK (2021) Der klimaaktiv Kriterienkatalog 2020. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. aufgerufen am 30. August 2021, <https://www.klimaaktiv.at/bauen-sanieren/gebaeuedeklaration/kriterienkatalog-2020.html> abgerufen
- Homeier I. (2019). Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050 - Die Wiener Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Hrsg.: Magistrat der Stadt Wien.
- Passivhaus Institut (2021). Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP). aufgerufen am 01. September 2021, von https://passiv.de/de/04_phpp/04_phpp.htm abgerufen
- Stöglehner G. (Projektleiter) (2011). ELAS – Energetische Langzeitanalysen für Siedlungsstrukturen, aufgerufen am 30. August 2021, <http://www.elas-calculator.eu/> abgerufen

KONTAKTDATEN:

Anna Maria Fulterer
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Email: a.m.fulterer@ace.at

Liste der Autoren

Baldwin / FH Burgenland GmbH / AT	383
Bärnthaler / FH-Joanneum / AT	71
Bauer / IBO / AT	293
Beckmann / Technical Office Beckmann / AT	19
Berger / Green4Cities GmbH / AT	409
Blanke / FH Aachen – University of Applied Sciences / DE	173
Bodner / TU Graz / AT	129
Bohrer / FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH / AT	285
Brandl / TU Graz / AT	187
Braunegg / ConsultAIR GmbH / AT	345
Brown / schwarz.platzer architekten / AT	433
Brüniger / Swiss Federal Office of Energy/ CH	307
Deutschmann / Heid und Partner Rechtsanwälte GmbH / AT	195
Díaz / ECODESIGN company GmbH / AT	307, 369
Dobra / Montanuniversität Leoben / AT	375
Doczekal / Güssing Energy Technologies GmbH / AT	215
Dopheide / Dipl.-Ing. Ralf Dopheide e.U. / AT	181
Döring / FH Aachen – University of Applied Sciences / DE	173
Erker / Slavonia Baubedarf GmbH / AT	417
Ettwein / FH Technikum Wien / AT	97
Fallmann / TU Wien / AT	335
Figl / IBO / AT	293, 375
Floss / Hochschule Biberach / DE	31, 105, 163
Fragner / JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mBH / AT	155
Fulterer / AEE INTEC / AT	433
Fürst / Hochschule Biberach / DE	163
Gennari / Fachhochschule Oberösterreich / AT	63
Glaser / TU Wien / AT	369
Gnam / FH Burgenland GmbH / AT	51
Gratzl / FH Salzburg / AT	187
Grim-Schlink / e7 energy innovation & engineering / AT	235
Gumhalter / AEE INTEC / AT	243, 255
Gursch / Know-Center GmbH / AT	187
Hacker / TU Graz / AT	129
Hagenkamp / FH Aachen – University of Applied Sciences / DE	173
Hammerl / StadtLABOR / AT	433
Heidinger / TU Graz / AT	129
Hengel / AEE INTEC / AT	205, 243, 255, 265
Herbst / Salzburg AG / AT	71
Heschl / FH Burgenland GmbH / AT	133
Hilbe / Hochschule Biberach / DE	31
Hofer / e7 energy innovation & engineering / AT	235, 315,
Höfler / AEE INTEC / AT	265, 433

Jankovic / WEGRAZ / AT	433
Jasek / Forschung Burgenland GmbH / AT	51, 361
Junasová / Slovak University of Technology / SK	275
Kelz / AEE INTEC / AT	71
Kendlbacher / IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH / AT	353
Kern / Know-Center GmbH / AT	187
Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT	133
Knoll / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT	181, 223
Knopper / IKK Engineering GmbH / AT	187
Koch / IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH / AT	353
Koller / Rabmer Bau & Umwelttechnik GmbH / AT	63
Königshofer / M.O.O.CON GmbH / AT	195
Kozek / TU Wien / AT	41, 335
Kräftner / Kräftner Landschaftsarchitektur / AT	181
Krail / FH Burgenland GmbH / AT	19
Krajčik / Slovak University of Technology / SK	275
Kremsner / Forschung Burgenland GmbH / AT	87
Kuhlmann / FH Burgenland GmbH / AT	301
Leindecker / FH OÖ StudienbetriebsGmbH / AT	285
Likozar / National Institute of Chemistry / SL	123
Lorber / ALLPLAN GmbH / AT	205
Maier / Forschung Burgenland GmbH / AT	79, 87
Makoschitz / AIT / AT	369
Malli / TU Graz / AT	129
Marhold / Forschung Burgenland GmbH / AT	87
Markl / normsonst ZT GmbH / AT	139
Minixhofer / BOKU / AT	409
Moderau / Hochschule Biberach / DE	105
Mudrá / Slovak University of Technology in Bratislava, SK	113
Müller-Thiede / M.O.O.CON GmbH / AT	195
Murschetz / TU Graz / AT	181
Oreski / PCCL – Polymer Competence Center Leoben GmbH / AT	375
Oswald / StadtLABOR / AT	433
Pertschy / AEE INTEC / AT	325
Petráš / TU Bratislava / SK	425
Pfeiffer / Forschung Burgenland GmbH / AT	51, 79, 87
Pichler / TBH GmbH / AT	265
Platzer / schwarz.platzer architekten / AT	433
Poks / TU Wien / AT	335
Pramhas / Thomas Lorenz ZT GmbH / AT	187
Pratter / 4ward Energy Research GmbH / AT	215
Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT	51
Rabensteiner / 4ward Energy Research GmbH / AT	59, 361
Rammerstorfer / e7 energy innovation & engineering / AT	315
Ramschak / AEE INTEC / AT	243, 255
Reitbauer / Steirereck GmbH / AT	265
Renkin / Büro für nachhaltige Kompetenz B-NK GmbH / AT	181, 223
Roschger / TU Graz / AT	129
Rüdissler / AEE INTEC / AT	325
Scharnhorst / IBO / AT	293

Schindler / Forschung Burgenland GmbH / AT	51
Schirrer / TU Wien / AT	41
Schittl / Forschung Burgenland GmbH / AT	19
Schlager / Know-Center GmbH / AT	187
Schmidt / TU Wien / AT	369
Schnepf / Green4Cities GmbH / AT	223
Schnitzer / StadtLABOR / AT	433
Schreiber / Zenebio GmbH / AT	395
Schwarz / schwarz.platzer architekten / AT	435
Seeber / FH Burgenland GmbH / AT	301
Seifter / Salzburg AG / AT	71
Siderius / Netherlands Enterprise Agency / NL	307
Šikula/ Brno University of Technology / CZ	275
Šimko/ Slovak University of Technology / SK	275
Stanger / TU Wien / AT	41
Stangl / BOKU / AT	409
Štefanec / NRG flex s.r.o. / SK	425
Štefanič / TU Bratislava / SK	401
Stefenelli / Stauss Perlite GmbH / AT	417
Stipsits /e7 energy innovation & engineering / AT	235, 315
Stolavetz/ Forschung Burgenland GmbH / AT	79
Stöller / Forschung Burgenland GmbH / AT	215
Straková / TU Bratislava / SK	401
Švarcová / TU Bratislava / SK	425
Szeliga / DIE ANTWORT – Büro für Informationstechnik GmbH / AT	409
Takács / Slovak University of Technology in Bratislava, SK	113
Theissing / FH-Joanneum / AT	71
Tomaschitz / Forschung Burgenland GmbH / AT	215
Turek / StadtLABOR / AT	433
Überbacher / WEGRAZ / AT	433
Veitsberger / normsonsult ZT GmbH / AT	139
Vollmann / Green4Cities GmbH / AT	223
Vondrus / CV-Consulting e.U. / AT	417
Wagner / AEE INTEC / AT	265, 325
Waringer /Sauter Mess- und Regeltechnik GmbH / AT	147
Warmuth / Fachhochschule Kärnten / AT	127
Warzecha / Mensch und Maschine Austria GmbH / AT	195
Weiß / AEE INTEC / AT	265
Weiss O. / BOKU / AT	409
Weiss A. P. / JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mbH / AT	155
Wenzl / JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mbH / AT	155
Werner / FH Technikum Wien / AT	97
Wiedemann / Rabmer GreenTech GmbH / AT	63
Wolf / TU Graz / AT	129

