

# ENERGIE UND KLIMAWANDEL

SCIENCE.RESEARCH.PANNONIA.  
Fachhochschule Burgenland  
Band 29

# e.nova

INTERNATIONAL CONFERENCE

## **Energie und Klimawandel**

**Energie – Gebäude – Umwelt**

14. und 15. Juni 2023

BAND 26

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

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

**HOLZHAUSEN**  
— Der Verlag —

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

Organisationskomitee: Bernhard Czerny  
Christian Heschl  
Christian Wartha  
Ernst Blümel  
Gernot Hanreich  
Marcus Keding  
Markus Puchegger  
Richard Krotil  
Rosa Weber  
Sebastian Schuh  
Werner Stutterecker

Die Beiträge der Autoren wurden in der zur Verfügung gestellten Fassung veröffentlicht.

Der internationale Kongress e-nova 2023 wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gefördert.

Eigentümer und Verleger  
Verlag Holzhausen GmbH, Traungasse 14-16, A-1030 Wien, Österreich  
Geschäftsführung: DDr. Gabriele Ambros  
Verlagsort: Wien – Herstellungsort: Wien – Printed in Austria

1. Auflage 2023  
ISBN: 978-3-903207-79-0

Copyright © Verlag Holzhausen GmbH, 2023  
Bibliografische Informationen der Österreichischen Nationalbibliothek und der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die ÖNB und die DNB verzeichnen diese Publikation in den Nationalbibliografen; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar. Für die Österreichische Bibliothek: [https:// onb.ac.at](https://onb.ac.at), für die Deutsche Bibliothek: <https://dnb.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 abrufbar.

[www.verlagholzhausen.at](http://www.verlagholzhausen.at)

# Wissenschaftlicher Beirat

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

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

Mag.<sup>a</sup> Hildegund Figl  
IBO-Österr. Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Österreich

DI Dr. Helmuth Kreiner  
TU Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Österreich

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

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

DI 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  
Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik u. Techn.  
Biowissenschaften, Österreich



# Vorwort

Und wieder kein Jahr wie jedes andere! So lautete die Einleitung des Vorworts im letzten Jahr. Aber auch heuer ist dieser Satz (leider) wieder zutreffend. Gab im Vorjahr noch die auslaufende Corona-Pandemie Anlass zu dieser Aussage, so ist es heuer der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine und die damit einhergehenden Verwerfungen auf den Energiemärkten mit deutlich spürbaren Auswirkungen wie einer stark steigenden Inflation. In allen damit einhergehenden Diskussionen darf aber das unermessliche Leid der Menschen in diesem Krieg weder vergessen noch relativiert werden.

Stark steigende Energiepreise haben in manchen Bereichen geradezu einen Paradigmenwechsel ausgelöst. Eine Aussage wie „ein beschleunigter Ausbau erneuerbarer Energie ist nötig, um die Energiepreise zu senken“, kann hier wohl beispielhaft genannt werden.

Energie und Klimawandel ist daher der Titel der diesjährigen Konferenz. Als internationale wissenschaftliche Konferenz konzipiert, richtet sich die e-nova sowohl an die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch an berufsfeldorientierte Fachleute. Beiträge beider Gruppen aus dem Bereich der anwendungsbezogenen Forschung und Entwicklung bieten einen Überblick zum Stand der wissenschaftlichen Entwicklung sowie über die Möglichkeiten und den Status der berufspraktischen sowie markttechnischen Umsetzbarkeit.

Auch für die Fachhochschule Burgenland ist 2023 kein Jahr wie jedes andere. Dies allerdings in einem positiven Sinne: Im Oktober wird unsere Fachhochschule ihr 30-jähriges Bestehen feiern!

Für den Fachhochschulsektor an sich ist 2023 jedoch durchaus ein schwieriges Jahr. Der vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung veröffentlichte Fachhochschul-Entwicklungs- und Finanzierungsplan 2023/24 – 2025/26 rief heftige und weit über den FH-Sektor hinausgehende Kritik hervor. Dabei unterstützen gerade Fachhochschulen durch ihre praxisorientierte Lehre und anwendungsbezogene Forschung die Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaft und wissensbasierten Gesellschaft. Die heurige e-nova ist auch dafür ein anschauliches Beispiel.

*Gernot Hanreich*  
Rektor



# Foreword

And once again, not a year like any other! That's how last year's foreword began. Unfortunately, however, this sentence also applies to 2023. While last year it was the fading corona pandemic that prompted the statement, this year it is Russia's war of aggression against Ukraine and the resulting distortions in the energy markets, with clearly noticeable effects such as sharply rising inflation. In all the discussions surrounding this, however, the immense suffering of the people affected by this war should not be forgotten or relativised.

The sharp rise in energy prices has led to a paradigm shift in some areas. A statement such as "The accelerated expansion of renewable energy is necessary to reduce energy prices" can probably be cited as an example.

Energy and Climate Change is therefore the title of this year's conference. Designed as an international scientific conference, e-nova is aimed at both academics and practitioners. Contributions from both groups in the field of application-oriented research and development will provide an overview of the state of scientific development as well as the possibilities and status of the practical implementation in the workplace and on the market.

For the University of Applied Sciences Burgenland, too, 2023 is not a year like any other. But in a positive sense: in October, our university will celebrate its 30<sup>th</sup> anniversary!

For the UAS sector itself, however, 2023 will definitely be a difficult year. The UAS development and financing plan 2023/24 - 2025/26 published by the Federal Ministry of Education, Science and Research provoked fierce criticism that went far beyond the UAS sector. Yet it is precisely the universities of applied sciences that support the transition to a sustainable economy and knowledge-based society through their practice-oriented teaching and application-oriented research. This year's e-nova is a vivid example of this.

*Gernot Hanreich*  
Rektor



# Inhaltsverzeichnis

## SESSION 2A: ÖKOLOGISCHE, WIRTSCHAFTLICHE UND SOZIALE ASPEKTE

<b>Suchverhalten in Energiedatenvisualisierungen: Einblicke durch Eye-Tracking</b>	17
Kremsner, Pfeiffer, Weidinger / Forschung Burgenland GmbH / AT	
<b>Entrepreneurship &amp; Sustainability for STEM Students</b>	23
Baldwin, Ernst / FH Burgenland GmbH / AT	

## SESSION 3A: GREEN ENERGY LAB - UPGRADING BUILDINGS

<b>Integration einer reversiblen Brennstoffzelle in ein Smart Energy Building</b>	31
Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT	
Heschl / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	
Banasiak / Montanuniversität Leoben / AT	
<b>Low-tech Gebäude oder doch Smart Building?</b>	39
Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT	
Haslehner / FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH / AT	
<b>Data-based Predictions of Load Profiles for Buildings for Flexible Optimization</b>	49
Poks, Lösch, Fallmann, Kozek / TU Wien / AT	
<b>Fault Detection applied on a real building</b>	55
Kührer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	
Hengel, Gumhalter / AEE INTEC / AT	

## SESSION 4A: GREEN ENERGY LAB - END USER INTEGRATION

<b>Green Energy Foresight as a Method to Increase Research Impact</b>	69
Kurz, Supper / Green Energy Lab / AT	
<b>Car-sharing as use case for V2X? A perspective of fleet managers</b>	77
Ettwein / FH Technikum Wien / AT	

## SESSION 5A: GREEN ENERGY LAB - GREEN HEATING & COOLING

<b>Prognosebasierte Regelung für Heizen und Kühlen im Gebäudesektor</b>	85
Kling, Wolf, Keller, Pröll / BOKU Wien / AT	
<b>Sani60ies - Fassadenintegrierte Bauteilaktivierung im Bestandsbau</b>	93
Keller, Wolf, Kling, Pröll / BOKU Wien / AT	
<b>Thermische Bauteilaktivierung und elektrische Speicher in Solar Energie Gebäuden</b>	101
Gumhalter, Ramschak / AEE INTEC / AT	
<b>Effiziente Booster/Basic-Wärmepumpen-Konzepte für die Sanierung</b>	109
Zotter / AEE INTEC & FH Joanneum / AT	

## SESSION 2B: QUARTIERE DER ZUKUNFT

<b>DigitalTwin – Eine Methodik zur automatisierten Performance-Analyse gebäudetechnischer Anlagen</b>	<b>123</b>
Stelzer, Dragosits, Ziermann / Forschung Burgenland GmbH / AT	
<b>Datengestütztes Modell zur Performance-Analyse von Lüftungs- und Klimaanlage</b>	<b>131</b>
Dragosits / Forschung Burgenland GmbH / AT	
<b>Das Prinzip der Schallausbreitung in flüssigen und gasförmigen Medien durch die Rohrwand und deren Messgrößen</b>	<b>139</b>
Brunner, Halper / FLEXIM GmbH / AT	
Ilko / FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH / DE	

## SESSION 4B: QUARTIERE DER ZUKUNFT

<b>Optimierung und Analyse von Warmwasserbereitungskonzepten in Kombination mit Kühlanwendungen von Wohngebäuden am Beispiel eines Studentenwohnheims</b>	<b>149</b>
Wessner / AEE INTEC / AT	
<b>Why is good indoor air quality needed in residential buildings?</b>	<b>157</b>
Strenk, Straková / TU Bratislava / SK	
<b>Working environment discomfort and its effect on workers performance</b>	<b>165</b>
Állóová, Straková / TU Bratislava / SK	

## SESSION 5B: DIGITALES BAUEN, PLANEN, BETREIBEN

<b>BIMpeco – Umweltrelevante Produktdaten im Gebäudelebenszyklus</b>	<b>175</b>
Huemer-Kals, Figl / IBO / AT	
Doczekal / GET / AT	
Hengel / AEE INTEC / AT	
<b>Fehlererkennung und Fehleranalyse durch Frequenzanalyse</b>	<b>181</b>
Schnitzer, Ziermann / Forschung Burgenland GmbH / AT	
<b>Methods for generating Data Models from Building Automation schemas via pdf parsing</b>	<b>189</b>
Buruzs, Sipetic, Natiesta, Catal, Widauer / AIT / AT	
Hollaus / Vasko+Partner GmbH / AT	

## SESSION 2C: ELEKTRONIK UND PHOTONIK

<b>Reflexionsspektren-basiertes Pflanzenmonitoring zur Vitalitätsbestimmung</b>	<b>199</b>
Schuh, Czerny / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	
<b>In-situ Delaminationsmessung in Mehrlagenstrukturen der Elektronik</b>	<b>207</b>
Walter, Khatibi / TU Wien / AT	
<b>Benefits and Challenges for Location-Based Services using Visible Light Technologies</b>	<b>215</b>
Krutzler, Weiss, Kröpfel / JOANNEUM RESEARCH / AT	

## SESSION 3C: ÖKOLOGISCHE, WIRTSCHAFTLICHE UND SOZIALE ASPEKTE

- Wie „fit“ sind „klimafitte“ Maßnahmen? – Methodenvorschlag zur interdisziplinären Bewertung von Wiener Parkanlagen** 223  
Michel, Helnwein / FH Technikum / AT
- Risikobewertung von Immobilienbeständen bei ESG Audits** 231  
Stocker, Koch / FH Kufstein / AT

## SESSION 4C: FORSCHUNGSHIGHLIGHTS JOSEF RESSEL ZENTRUM LISA

- Carbon Footprint - Fernkältebereitstellung mittels Kompressionskältemaschinen** 239  
Rixrath, Schauer / Josef Ressel Zentrum / AT  
Weber, Krail, Piringer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT  
Buchner, Zisser / Wien Energie GmbH / AT
- Numerical modelling and bi-objective optimisation of a CCHP process using low temperature heat sources** 249  
Schittl, Sanz / TU Graz / AT  
Krail, Krottil / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT  
Zisser, Buchner / Wien Energie GmbH / AT
- Lebenszyklusorientierte Kostenbewertung eines integrierten Energiesystems** 259  
Rixrath, Schauer / Josef Ressel Zentrum / AT  
Sabo, Piringer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT

## SESSION 5C: NETZE UND SPEICHER

- Unit Commitment für saisonale Speichertechnologien** 273  
Schindler, Jasek, Medwenitsch, Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT  
Gnam / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT
- Control-oriented test bed for mobile air conditioning systems** 281  
Lösch, Fallmann, Kozek / TU Wien / AT
- An international policy-oriented workstream for energy efficiency of Data centres** 287  
Díaz Triana / ECODESIGN / AT

## POSTER

- Building a laboratory for simultaneous testing of radiant floor, ceiling and wall systems** 297  
Šimko, Petráš, Szabó, Krajčák / TU Bratislava / SK
- Is the air in primary schools as bad as we think?** 303  
Štefanič / TU Bratislava / SK

- AutorInnen** 311



# **Session 2a**

## **Ökologische, wirtschaftliche und soziale Aspekte**

### **Suchverhalten in Energiedatenvisualisierungen: Einblicke durch Eye-Tracking**

Kremsner, Pfeiffer, Weidinger / Forschung Burgenland GmbH / AT

### **Entrepreneurship & Sustainability for STEM Students**

Baldwin, Ernst / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT



# Suchverhalten in Energiedatenvisualisierungen: Einblicke durch Eye-Tracking

T. P. Kreamsner, C. Pfeiffer, S. Weidinger  
*Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich*

**ABSTRACT:** Home Energy Management Systeme (auch HEMS genannt) helfen den Nutzer\*innen dabei, einen Einblick in ihr Stromverbrauchsverhalten zu erhalten. Diese Systeme zeigen in grafischer Form, wie viel Strom im Haushalt verbraucht wird, um Energiesparpotentiale zu erkennen. Für Menschen ohne viel Hintergrundwissen zu Energiethemen ist es jedoch oft sehr schwierig, die Energiedaten vollständig zu verstehen. Viele Studien haben sich schon damit beschäftigt, wie man Energiedatenvisualisierungen gestalten sollte, damit sie von den User\*innen möglichst einfach verstanden werden können. Dennoch gibt es noch keinen Konsens darüber, wie Energiedaten am besten grafisch aufbereitet werden sollten. Die Möglichkeiten reichen von möglichst einfachen Diagrammen wie Balkendiagrammen bis hin zu aufwendigen Infografiken. Was sich jedoch schon gezeigt hat ist, dass verschiedene Energiedatenvisualisierungen einen großen Einfluss auf die Augenbewegungen der User\*innen haben. Dies bedeutet, dass manche Grafiktypen eher dazu geeignet sind, dass User\*innen schnell zu den gewünschten Informationen gelangen. Ziel dieser Studie ist es herauszufinden, welche Grafiktypen am besten geeignet sind, damit sich Personen ohne umfassendes Hintergrundwissen zum Thema Energie leichter in Energiegrafiken zurechtfinden. Zu diesem Zweck wurde ein Usability-Test mit Hilfe von Eye-Tracking für gängige Energiedatenvisualisierungen (Balken-, Flächen- und Windrosendiagramm) durchgeführt. In dem experimentellen Setting wurde den 50 Proband\*innen zufällig einer der drei Grafiktypen zugeordnet. Innerhalb der Grafiktypen mussten die Proband\*innen 3 Suchaufgaben lösen. Anschließend wurden Blickbewegungsmetriken wie Fixationen und Sakkaden für die verschiedenen Grafiktypen verglichen und gegenübergestellt. Weiters wurde analysiert, wie das generelle Suchverhalten von User\*innen in Energiedatenvisualisierungen ist und welche Suchstrategien sie aufweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Augenbewegungen je nach Grafiktyp sehr unterscheiden können, beispielsweise benötigen User\*innen in Balkendiagrammen weniger Fixationen, um zu den gewünschten Informationen zu gelangen. Weniger häufig genutzte Grafiktypen verwirren User\*innen und führen zu mehr Sakkaden im Vergleich zu bekannten Grafiktypen. Die Ergebnisse der Studie helfen, das Nutzerverhalten bei Energiethemen besser zu verstehen und Energiedatenvisualisierungen benutzerfreundlicher zu gestalten.

## 1 EINLEITUNG

Angesichts der aktuellen Entwicklungen des Klimawandels besteht dringender Handlungsbedarf auf allen Ebenen. Ein großes Potenzial zur Energieeinsparung besteht in den Haushalten durch die Reduzierung des Stromverbrauchs. Was jedoch teilweise fehlt, ist ein klarer Überblick über den eigenen Energieverbrauch, sowohl in Bezug auf die Gesamtmenge als auch auf den Verbrauch einzelner elektronischer Geräte. Eine Möglichkeit, Verbraucher\*innen einen umfassenden Überblick über ihre Energieverbrauchsdaten zu bieten, besteht darin, Home Energy Management Systems (HEMS) einzusetzen. Diese Softwaresysteme zeigen Diagramme an, die den Stromverbrauch und die Stromerzeugung verschiedener Geräte darstellen. Ein wichtiges Merkmal dieser Diagramme ist, dass sie Anomalien und ungewöhnliche Muster im Stromverbrauch aufzeigen können, um so den Verbraucher\*innen eine Orientierung über die größten Stromverbraucher in ihrem Haushalt zu geben (Holmes 2007).

Diese Informationen können den Verbraucher\*innen helfen, einen besseren Überblick über ihren Energieverbrauch im Haushalt zu erhalten, was möglicherweise zu Verhaltensänderungen führen kann, die den Energieverbrauch reduzieren (Cao et al. 2018). Um eine langfristige Nutzung von Home Energy Management Systemen zu gewährleisten, müssen die Energiedatenvisualisierungen leicht verständlich sein und die Nutzer\*innen auch emotional ansprechen (Valor et al. 2022). Um eine leichte Verständlichkeit der Diagramme zu erreichen, gibt es verschiedene Grafiktypen, da jeder Mensch Grafiken unterschiedlich wahrnimmt, interpretiert und versteht. Diagramme zum Energieverbrauch können von einfachen Liniendiagrammen bis hin zu komplexen Rosendiagrammen reichen (Chen & Chen 2021).

Die Gestaltung von Visualisierungen beeinflusst, wie leicht Nutzerinnen und Nutzer bestimmte Arten von Energievisualisierungen verstehen können. Um die kognitive Beanspruchung bei Suchaufgaben zu erkennen, können Augenbewegungen als Indikator herangezogen werden (Conati et al. 2020; Goldberg & Helfman 2014). Eine erhöhte Anzahl von Fixationen (Blicke in einen bestimmten Bereich) kann beispielsweise darauf hindeuten, dass dieser Bereich schwieriger zu verstehen ist und daher länger betrachtet wird (Bojko 2013; Tatler et al. 2005; Goldberg & Helfman 2014). Auch die Eye-Tracking-Metrik „Revisits“ (wie oft ein bestimmter Bereich erneut betrachtet wird) kann Aufschluss darüber geben, ob bestimmte Bereiche gut oder weniger gut verständlich sind.

Verschiedene Nutzer\*innengruppen haben unterschiedliche Blickbewegungen während der Suche, z.B. verbringen Expert\*innen weniger Zeit mit irrelevanten Teilen von Diagrammen als Nicht-Expert\*innen (Ruf et al. 2013). Weiters werden bekannte Visualisierungsformen schneller erfasst als unbekannte (Goldberg & Helfman 2014). Augenbewegungsmetriken wie Fixationen können Unterschiede zwischen verschiedenen Diagrammtypen oder Nutzer\*innen aufdecken und auf Schwierigkeiten beim Verständnis der Daten hinweisen. Es gibt auch keinen universellen Diagrammtyp, der für alle Daten und Nutzer\*innen geeignet ist. (Bojko 2013; Tatler et al. 2005; Goldberg & Helfman 2014).

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass sich der Grafiktyp auf das Verständnis und auch auf die Augenbewegungen der Proband\*innen auswirken. In dieser Studie soll untersucht werden, welche Grafiktypen sich vorteilhaft auf das Suchverhalten in Energiedatenvisualisierungen auswirken. Dies soll dabei helfen, einfache Visualisierungsformen für Energiedaten zu erörtern.

Dazu wird für die Arbeit folgende Forschungsfrage gestellt:

- Wie unterscheiden sich die Blickbewegungen bei der Suche nach Informationen in Energiedatenvisualisierungen nach Grafiktyp?

## 2 METHODE

Um das Forschungsanliegen adäquat beantworten zu können, wurde ein Usability-Test mithilfe von Eye-Tracking und einer Gesichtsausdrucksanalyse eingesetzt.

Für die Studie wurden in Zusammenarbeit mit einer Studierendengruppe der FH Burgenland insgesamt 50 Proband\*innen rekrutiert. Das Durchschnittsalter der 27 Frauen und 23 Männer in der Stichprobe betrug 31 Jahre ( $\pm$  13 Jahre). Alle Proband\*innen in diesem experimentellen Setting erhielten jeweils eine Art der Energiedatenvisualisierung (Balken-, Flächen- oder Windrosendiagramm - siehe dazu Abb. 1).

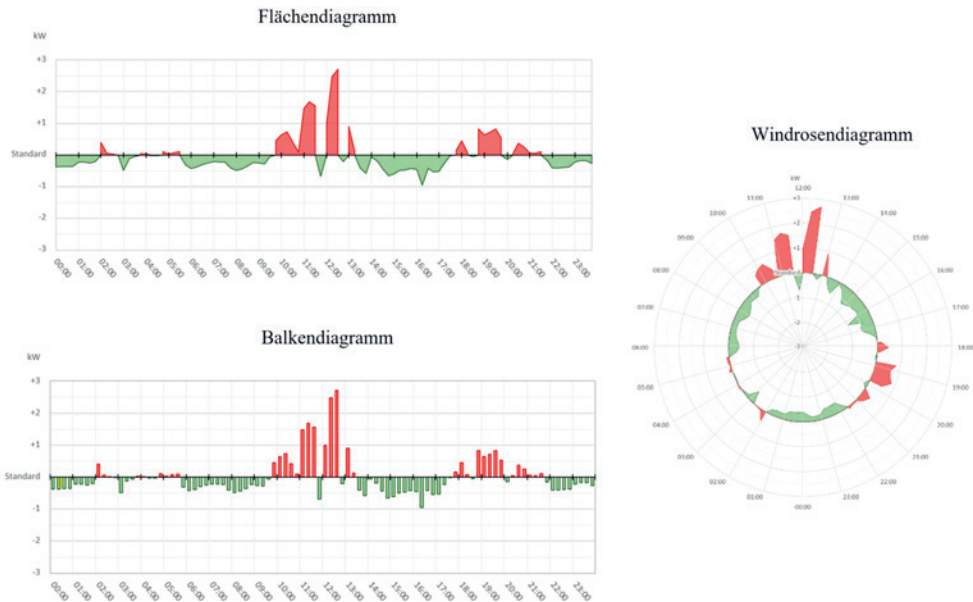


Abb. 1: Diagrammarten in der Studie

Die Energiedatenvisualisierungen zeigten die Stromverbrauchsdaten eines Mehrpersonenhaushalts in Ostösterreich im Tagesverlauf. Grüne Bereiche zeigen jeweils, dass weniger Strom verbraucht wurde als im Tagesdurchschnitt, rote Bereiche zeigen einen überdurchschnittlichen Verbrauch an. Innerhalb dieser Stromverbrauchsdiagramme mussten die Proband\*innen 3 Suchaufgaben lösen und bestimmte Daten finden. In Tab. 1 sind die Suchaufgaben aufgelistet.

Tab. 1: Gestellte Suchaufgaben in der Studie

	Suchaufgaben in der Studie	Fragentyp
T1	Um welchen Wert liegt die heutige Leistung kurz nach 11:00 Uhr über der durchschnittlichen Leistung? <sup>a</sup>	Offene Frage
T2	In welchem Zeitraum wurde der meiste Strom eingespart?	Einfachauswahl
T3	Welche der folgenden Maßnahmen würde den Stromverbrauch langfristig senken?	Multiple Choice

<sup>a</sup> Antwort in KW.

Der Usability Test wurde mit Eye-Tracking und einer automatischen Gesichtsausdrucksanalyse mithilfe der Software iMotions 9.0 ergänzt um mitzuverfolgen, bei welcher Grafikart die Antwort schneller zu sehen ist und bei welchem Grafiktyp mehr Zeit für die Suche benötigt wird (Bojko 2013). Die Analyse der Gesichtsausdrücke diente zusätzlich dazu um herauszufinden, ob die Gesichtsausdrücke bei der Suche positiv oder negativ waren. Vor der Studiendurchführung wurden die Proband\*innen gebeten, eine Einverständniserklärung für die Teilnahme zu unterschreiben.

### 3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass es einen großen Unterschied im Suchverhalten zwischen den einzelnen Grafiktypen gibt. Tab. 2 zeigt die durchschnittlichen Fixationsdauern (Blicke in einen bestimmten Bereich in Millisekunden, gemessen mit Eye-Tracking) für verschiedene Bereiche nach Grafiktypen, sowie die Anzahl der Sakkaden („Sprünge“ zwischen Fixationen) (Bojko 2013).

Tab. 2: Fixationsdauern je Grafikbereich, n= 50, Alle Fixationsdauern in Millisekunden

Diagrammart	Fixation auf die Legende	Fixation auf sonstige Grafikbereiche	Fixation auf die korrekte Antwort	Fixation auf die Suchaufgabe	Anzahl Sakkaden
Balken	290,23	248,41	290,23	267,95	61,34
Fläche	322,99	275,97	322,99	345,03	63,52
Windrose	412,80	309,25	412,80	298,43	58,02

Bei der Windrose ist die Fixation auf die „Korrekte Antwort“ am längsten. Dies kann darauf hinweisen, dass man hier am längsten auf die richtige Antwort sehen musste, bis man die finale Antwort eingetippt hat und zur nächsten Frage vorangeschritten ist. Dies würde auf eine Unsicherheit bei der Beantwortung der Suchaufgabe hinweisen. Die Anzahl der Sakkaden sind bei der Windrose ebenfalls am niedrigsten. Als Grund hierfür wird angenommen, dass man viele Blicke in einem räumlich zusammenhängenden Bereich hatte und somit die Anzahl der Sakkaden niedriger ist. Die Fixation auf die Legende war auch am längsten bei der Windrose.

Beim Balkendiagramm sah man am wenigsten lange auf die Legende, dies deutet daraufhin, dass man Balkendiagramme und den Aufbau einfach verstehen konnte. Auch auf die korrekte Antwort sah man am wenigsten lange, bevor man die richtige Antwort eingab. Insgesamt sind die Fixationsdauern beim Balkendiagramm in verschiedenen Bereichen sehr kurz im Vergleich zu den anderen Grafiktypen.

Das Flächendiagramm liegt hier wertemäßig in der Mitte. Dies bedeutet, dass die richtige Antwort zwar nicht so schnell gefunden wurde wie im Balkendiagramm, aber dennoch schneller als in der Windrose. Zusammengefasst kann erkannt werden, dass das Balkendiagramm Personen ohne großem Hintergrundwissen zu Energiethemen hilft, schneller die gewünschte Antwort zu finden.

Zusätzlich zu den Eye-Tracking Daten wurden auch die Gesichtsausdrücke der Proband\*innen gemessen, um das Suchverhalten genauer interpretieren zu können. Hierbei wurde analysiert, wie sich die Gesichtsausdrücke (positiv/negativ) im Suchverlauf auf Sekundenbasis verändern (siehe Abb. 2).

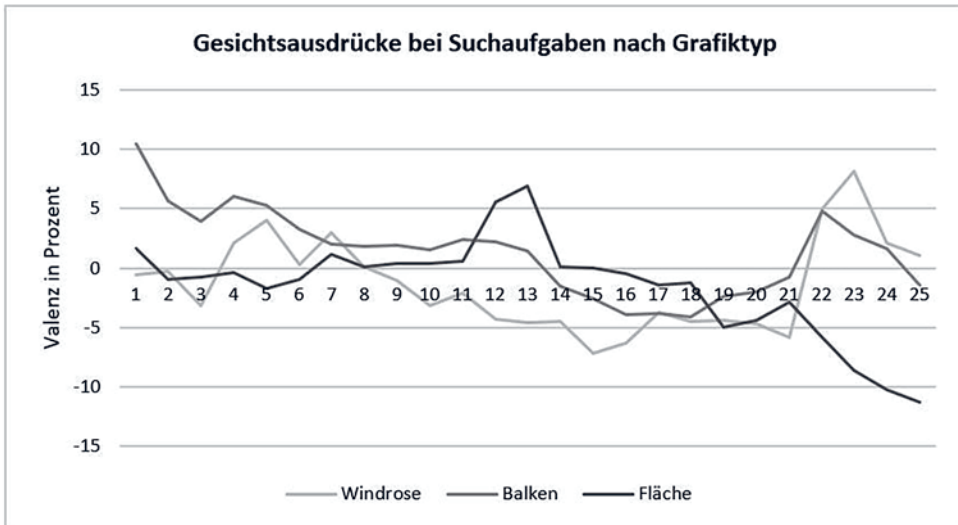


Abb. 2: Gesichtsausdrücke bei den Suchaufgabe nach Grafiktyp, x-Achse zeigt die Sekunden, die y-Achse zeigt die Valenz (positive Werte zeigen positive Gesichtsausdrücke und negative Werte zeigen negative Gesichtsausdrücke)

In der Grafik ist zu erkennen, dass das Balkendiagramm im Vergleich zu den anderen Grafiktypen zunächst die positivsten Gesichtsausdrücke im Suchverlauf zeigt. Die Gesichtsausdrücke beginnen erst ab Sekunde 14 im Durchschnitt negativ zu werden, da man Probleme mit der Suche hat. Dies deutet darauf hin, dass das Balkendiagramm auf den ersten Blick verständlich erscheint, im weiteren Verlauf der Suche jedoch Probleme bei der Suche auftreten. Anders verhält es sich bei Windrosen- und Flächendiagrammen. Bei der Windrose sind die Gesichtsausdrücke in den ersten Sekunden eher negativ. Nach 4 Sekunden werden die Gesichtsausdrücke zwar wieder positiv, fallen aber ab Sekunde 9 wieder in den negativen Bereich. Beim Flächendiagramm sind die Gesichtsausdrücke eher neutral (nahe 0) und werden ab Sekunde 16 negativ. Auch hier bestätigt sich das Bild, dass das Balkendiagramm am einfachsten zu lesen ist, gefolgt vom Flächendiagramm und dann vom Windrosendiagramm.

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Analysiert wurde innerhalb dieser Studie, wie sich die Blickbewegungen je nach Grafiktyp unterscheiden. Hier kann man insgesamt erkennen, dass die Fixationsdauern auf die korrekte Antwort beim Balkendiagramm am niedrigsten sind, gefolgt von Flächen- und Windrosendiagrammen. Bei Windrosendiagrammen sind die Fixationsdauern am längsten, dies deutet auf eine hohe kognitive Belastung hin. Auch die Daten der Gesichtsausdrucksanalyse deuten darauf hin, dass Balkendiagramme die meisten positiven Emotionen im Vergleich zu Flächen- oder Windrosendiagrammen auslösen. Die Windrosendiagramme lösten die meisten negativen Gesichtsausdrücke aufgrund der untypischen Darstellung aus.

Als Schlussfolgerung für diese Studie kann genannt werden, dass Studienteilnehmer\*innen einfache Energievisualisierungen bevorzugen, vor allem Balken- und Flächendiagramme kommen sehr gut an. Die Mehrheit der Proband\*innen hatte kein detailliertes Wissen zu Energiethemen. Daher kann argumentiert werden, dass sich diese Personengruppe einfache Grafiken wünscht, um sich mit dem Energiethema vertraut zu machen. Von Grafiken wie Windrosendiagrammen sollte man eher absehen, da diese Diagrammtypen eher negative Emotionen bei den potentiellen Nutzer\*innen auslösen und die

Nutzungsintention dadurch reduziert werden könnte. Als Limitation kann genannt werden, dass noch weitere Grafiktypen in Zukunft analysiert werden sollten.

## LITERATUR

- Bojko A. (2013) Eye tracking the user experience: A practical guide to research. Rosenfeld Media.
- Cao N., Lin Y. R., Gotz D. & Du F. (2018). Z-Glyph: Visualizing outliers in multivariate data. *Information Visualization*, 17(1), 22-40.
- Chen X., Chen X. (2021) Data visualization in smart grid and low-carbon energy systems: A review, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31(7), e12889.
- Conati C., Lallé S., Rahman M. A. & Toker D. (2020) Comparing and combining interaction data and eye-tracking data for the real-time prediction of user cognitive abilities in visualization tasks. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 10(2), 1-41.
- Goldberg J. H. & Helfman J. I. (2014) Eye tracking on visualizations: Progressive extraction of scanning strategies. *Handbook of Human Centric Visualization*, 337-372.
- Holmes T. G. (2007) Eco-visualization: combining art and technology to reduce energy consumption, *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI conference on Creativity & cognition*, S. 153-162.
- Ruf V., Horrer A.; Berndt M.; Hofer S.I.; Fischer F.; Fischer M.R.; Zottmann J.M.; Kuhn J.; Küchemann S. (2023) A Literature Review Comparing Experts' and Non-Experts' Visual Processing of Graphs during Problem-Solving and Learning. *Educ. Sci.*, 13, 216.
- Tatler B. W., Baddeley R. J. & Gilchrist I. D. (2005) Visual correlates of fixation selection: Effects of scale and time. *Vision Research*, 45(5), 643-659.
- Valor C, Antonetti P, Crisafulli B. (2022) Emotions and consumers' adoption of innovations: An integrative review and research agenda. *Technol Forecast Soc Chang*; 179.

# Entrepreneurship & Sustainability for STEM Students

A. Baldwin, J. Ernst

*Fachhochschule Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich*

**ABSTRACT:** The current situation of our society requires a proactive approach in order to shape society and the economy, as a part of it, in such a way that socially and environmentally compatible economic activity becomes the norm. Education and educational institutions should support society on this path through their educational offers. In our course, we therefore combine sustainable development, Big Data & AI and entrepreneurship in order to sensitise and interest students from STEM degree courses in the opportunities that arise through environmentally and socially responsible entrepreneurship and ethical-ecological business. Sustainability, big data, AI and business administration are normally considered isolated disciplines; our course uses the intersections of these disciplines to introduce student groups from outside of business administration to future-oriented entrepreneurship. The increased emergence of entrepreneurship topics in science and society is due to the necessity of (pro)active action in relation to current societal challenges. This also includes initiatives on the part of the education sector within the framework of entrepreneurship education

## 1 INTRODUCTION

During the re-accreditation in autumn 2021, the courses BWL1 and BWL 2 of the Bachelor's degree programmes Building Technology and Automation and Energy and Environmental Management were revised. As part of this revision, the goal of the course and the didactic approach to the topic of business administration were redefined: students should be enabled to implement solutions to societal challenges (such as the climate crisis and related challenges) with the help of their technical know-how and business skills.

The pilot course, which was launched between the Department of Economics and the Department of Energy and Environmental Management in the winter semester 2021, was revised and implemented again for the winter semester 2022 and is now anchored in the curricula of two degree programmes.

The central learning objective "to promote start-up competence among STEM students" is achieved by promoting three areas of competence:

- Knowledge/knowhow (business knowledge, sustainable business models, Big Data & AI as enablers)
- Skills/Social Skills (creativity, communication, independence, teamwork)
- Attitudes/entrepreneurial mindset (self-initiative, awareness of action, future orientation, business thinking and acting)

The development of these competences is necessary to cope with the challenges facing society, as it requires people who want to initiate projects and shape things independently. Against this background is the fact that only 9% of all young entrepreneurs come from non-university research institutions or universities. The use of some of the knowledge created in these institutions in established companies (i.e. those that are older than 3.5 years) also indicates a decline (from 7% to 4%; Friedl et al. 2021, p. 58). The lack of spin-offs - due to the low knowledge transfer to society and the low rates of implementation of research findings in the economy - as well as a lack of entrepreneurial mindset in the Austrian population as a whole are frequent topics in relevant research and practice reports.

The current situation of our society requires a proactive approach in order to shape society and the economy, as a part of it, in such a way that socially and environmentally compatible economic activity becomes the norm. Education and educational institutions should support society on this path through their educational offers. In our course, we therefore combine sustainable development, Big Data & AI and entrepreneurship in order to sensitise and interest students from STEM degree courses in the opportunities that arise through environmentally and socially responsible entrepreneurship and ethical-ecological business.

Real-world learning opportunities (e.g. Agenda 2030 for Sustainable Development) are an appropriate way for students to develop key competences in sustainability. The ‘typical’ real-world learning opportunities (e.g. internships, service learning and project-based learning) indicate that these opportunities support students in developing some key competences and enable the development of competences such as problem solving, linking knowledge and action and collaborative working. (Brundiens et al. 2009)

### 1.1 CENTRAL ASPECTS OF THE NEW APPROACH

The central learning objective of the is to promote start-up skills among STEM students. This involves a) building up knowledge on topics from business studies regarding sustainable business models, as well as big data and AI as enablers, b) promoting social skills, such as creativity, working with diverse teams and c) developing the entrepreneurial mindset by creating awareness of one’s own actions and their effects and future-oriented thinking and acting.

The cooperative form of teaching and learning is evident in the course on several levels: a) cross-departmental curricula development, b) interdisciplinary course by three teachers and linking of many topics (complex realistic) c) transdisciplinary setting with the aim of building a real business model.

Based on the teaching-learning objective: “to promote start-up competence among STEM students” and the consideration of the addressed foci “Big Data & AI, Business Administration and Agenda 2030”, it is important for the course to develop a competence-based and needs-oriented teaching offer. In the recommendations of the Council of the European Union (2018), eight key competences are considered relevant for all learners. These include the promotion of entrepreneurship, which is described as an “ability to transform opportunities and ideas into value for others. It is based on creativity, critical thinking and problem solving, initiative and perseverance, and the ability to work with others to plan and implement projects that are of cultural, social or financial value.”

The tripartite division of entrepreneurial competence (Council of the European Union 2018) includes knowledge, skills and attitudes and paves the way for the increased emergence of entrepreneurship topics in science and society is due to the necessity of (pro)active action in relation to current societal challenges. Entrepreneurship education can be defined as a “scientifically based examination of the promotion of competences relevant to entrepreneurship and the educational structures required for this, while adopting a reflective attitude towards the effects of entrepreneurial activity on society” and the environment (Halbfas & Liszt-Rohlf 2019, p. 18). In entrepreneurship education, the didactic model for entrepreneurship education for the STEM sector is important in order to promote competences that are appropriate to needs and secure the future, in addition to the identification of competences relevant to entrepreneurship and the cooperation of all stakeholders, such as learners, teachers, politicians and researchers (Byrne et al. 2015, p. 283). Entrepreneurship education for the STEM sector should support students in the sense of constructivism (Kleine et al. 2019, p. 102): (1) build a basic understanding of entrepreneurship, (2) acquire the ability to transfer what they have learned into reality and thus create value (from a sustainable point of view) and (3) (further) develop their own entrepreneurial mindset with a global view of the ensuing opportunities.

### 1.2 BILINGUALISM IN LEARNING

Lin & He (2019) describe the positive impact of foreign language proficiency on academic achievement and confirm previous studies that demonstrate a positive association between language proficiency and

learners' academic performance in a bilingual environment. What has long been considered elitist is a must in the current job market: a good command of English. According to a ranking published by Education First (EF), which used 2.1 million tests around the world, Austria and its population's English proficiency ranked third (behind the Netherlands and Singapore, but ahead of Norway) out of 111 countries surveyed. In order to continue this positive development, this course is designed bilingually. It is communicated from the beginning which teachers work in which language in order to minimise fear of contact. For most students, it is the first time that content is worked on in English outside of English lessons. Active participation is particularly positively emphasised and free speaking becomes the norm in many exercises preparing for final presentations.

### **1.3 DIVERSITY AS AN OPPORTUNITY**

Cooperative learning in culturally mixed groups promotes the reduction of prejudices and at the same time creates a broadening of horizons (Dubs 2009, pp. 471-475). When working with diverse groups (diversity in the sense of Gardenswartz & Rowe, 1998), it is advisable for teachers to reflect on their own behaviour with regard to dealing with the group. In doing so, teachers should be aware of the socio-economic and cultural composition of the group, but avoid pre-judgement. This is all the more successful the more is known about the individual cultures and the more experience has been gained with different cultures. This also succeeds in the present course because the teachers conduct diversity training and most of them have an international background themselves. The groups formed in this process were led by the teachers after a diversity exercise unit. It was important to create a high level of diversity in the group in order to generate as much creativity as possible. For this reason, the students went through some diversity exercises in the first step. Based on these experiences and the information provided by the students, group leaders and finally diverse teams with three to five members were formed (see Dubs 2009, pp. 207-208).

### **1.4 LEGO ® SERIOUS PLAY®**

At the beginning of the course, the students create a team and a business idea with Lego® Serious Play®, which they develop in several iterations during the course.

The Lego ® Serious Play ® (LSP) method enables a group to share ideas, opinions and insights and to go deeper into the process of problem solving. The process of this method is shaped into a recurring cycle of building, reflecting and building a shared understanding. Typical areas of application are individual coaching, idea development, identification of values, team building, vision development of a group, (product) innovations and the development of strategies and scenarios (Blair & Rillo 2016, pp. 60-72).

It is known from scientific studies accompanying LSP processes that the method promotes individual flow experiences in the form of feelings of happiness and autotelic behaviour (purpose-free but meaningful action in the game). This in turn can lead to the team's end result being more creative than with classical methods. It is important to separate individual and group phases and to clearly structure the process, which includes reflection as an essential component (Zenk et al. 2020, pp. 353-357). All participants fulfil the same tasks, which leads to a high level of engagement of all participants and, based on this, to a broad spectrum of ideas (McCusker 2020, 146).

### **1.5 BLENDED LEARNING**

Blended learning can be used optimally in this setting. While the teambuilding and idea generation with Lego®SeriousPlay® take place in face-to-face sessions, the teaching of standard business principles can be covered well online. Critical reflection and presentation of the respective virtual business ideas are then practised again in face-to-face sessions; this also minimises inhibitions about doing this in English, the foreign language.

## 2 COURSE ASSESSMENT

The final products in both semesters are a test and a presentation of the business idea (pitch) of the individual virtual business idea. The tests comprise a total of 10 multiple choice questions from 6 business administration sub-disciplines and are in German, the presentations are in English. The presentations of the business idea will be given in the first semester to the target group FFF (Friends, Family, Fools), i.e. people willing to invest, and in the second semester to an audience of experts at a scientific conference on the topic of sustainability. This virtual business idea serves to work through the business topics taught using a tangible example. This approach is effectively a recognised way of learning in cognitive science, involving three principles (Butler et al. 2014):

### 2.1 STUDENT FEEDBACK

The courses at the UAS Burgenland are evaluated anonymously by the students using the Evasys survey software. However, the predominantly very good ratings in the quantitative evaluation by the students in this degree programme are only of limited significance due to a response rate of approx. 20-30%. A comment by a student in the course of the anonymous evaluation in the summer semester 2022 showed that the structure of the course was very well received. In order to obtain detailed qualitative feedback on the entire course, a student was also asked to give detailed feedback, which was evaluated here in a structured and anonymous way. The design of the integrated course (lecture in DE, exercise in EN) was seen as very helpful for the entire learning process. A realistic assessment of the initial situation and the acquired competences is evidence of the importance of economic content in STEM subjects.

### 2.2 INTEGRATION OF DIFFERENT EXPERTISE/DIVISION OF LABOUR

The course is taught by a team of three lecturers, each of whom brings their own focus to the course. One prepares the basic knowledge of business administration. The next introduces openness to innovation and creativity as well as an entrepreneurial mindset. Target group-oriented knowledge transfer and presentation techniques are taught in English by a third lecturer. All three place their respective topics in the context of a changing economic structure in the direction of a circular economy and sustainability and rely on learner-centred didactics.

Practical relevance for students due to case analyses and transfer of learning into implementation (i.e., development of a real business idea). The students deal intensively with the analysis of existing companies as part of the development of business knowledge and thus learn directly from real cases (case analyses, website analyses). These insights are combined with the creative ideas from the course and put into practice when building their own business idea.

Integration of diverse students and challenge of students on the level of social competences (openness, dealing with diverse team members, dealing with own prejudices, working in a foreign language).

Cooperation happens on four levels: Cooperation of study programmes at two locations, cooperation of disciplines (economics and energy & environment/building technology), cooperation of three teachers, cooperation of diverse students (team building after diversity exercises), cooperation between university (science & teaching) and practice (business) by developing real business ideas and presenting them at a conference (target group: science and business).

As part of an internal (pre-)project accompanying this course, in the summer semester of 2022 five students from the Bachelor's degree programme in International Business Relations (BIWB) developed case studies from building services engineering or energy and environmental management with business management content and conducted guideline-based expert interviews with experienced, external teachers in order to learn more about the competences and teaching content that are important for STEM students in practice. The result shows that in addition to business knowledge, technicians are also required to have social skills, project management skills and basic knowledge of business law

(investment calculations, profitability analyses). Another result of this project was the creation of a comprehensive case study that can be used as an example in the transdisciplinary course. The findings on competences and teaching content were used to improve the course.

The course will continue to be used as a compulsory subject in both BA degree programmes and will be further developed according to the evaluations.

The students from the courses already completed can also contact the lecturers afterwards with questions regarding the implementation of the start-up idea, who, in addition to their own expertise, also have a good connection to the South Hub (start-up promotion in Burgenland, Business Agency).

### 3 SUMMARY AND OUTLOOK

Due to the very positive evaluations, the programme directors from the two Bachelor's programmes mentioned above, Building Technology and Automation and Energy and Environmental Management, asked to take on another course. With similar teaching-learning concepts, the course Innovation Management can be offered by the three lecturers in the summer semester 2023.

Due to the very positive evaluations of the course, this teaching-learning concept should continue to be integrated in the form of the firmly integrated module (compulsory subject) of the two BA degree programmes. In addition, there are already considerations to offer or integrate the course in other degree programmes in other departments. A possible field of action could also be the health sector, for example, since an urgent need for action for new business models has developed due to the social challenge of an ageing society and the lack of skilled workers in nursing.

### LITERATURE

- Blair S., Rillo M. (2016) *Serious Work. Meetings und Workshops mit der Lego® Serious Play® Methode moderieren mit bewusster Inkompetenz. Vom Englischen ins Deutsche übersetzt von Dröge, Jens.* München: Franz Vahlen.
- Butler A. C., Marsh E. J., Slavinsky J. P. & Baraniuk R. G. (2014) Integrating cognitive science and technology improves learning in a STEM classroom. *Educational Psychology Review*, 26(2), 331-340. <https://doi.org/10.1007/s10648-014-9256-4>
- Brundiers K., Wiek A. & Redman C. L. (2010) Real-world learning opportunities in sustainability: From classroom into the real world. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 11(4), 308-324. <https://doi.org/10.1108/14676371011077540>
- Byrne J., Fayolle A. & Toutain O. (2015) Entrepreneurship Education: what we know and what we need to know. Chell E. & Karatas-Özkan M. (Hrsg.): *Handbook of Research on Small Business and Entrepreneurship.* Cheltenham u.a.: Edward Elgar, S. 261-288.
- Dubs R. (2009) *Lehrerverhalten. Ein Beitrag zur Interaktion von Lehrenden und Lernenden im Unterricht.* Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Friedl C., Frech B., Kirschner E., Koren S. & Wenzel R. (2021) *Global Entrepreneurship Monitor – Bericht zur Lage des Unternehmertums in Österreich in der Covid-19-Pandemie.* Graz: FH Joanneum University of Applied Sciences.
- Gardenswartz L. & Rowe A. (1998) *Managing Diversity: A Complete Desk Reference and Planning Guide, 2. Auflage.* New York: McGraw-Hill.
- Halbfas B. & Liszt-Rohlf V. (2019) *Entwicklungslinien und Perspektiven der Entrepreneurship Education – eine Analyse von Definitionen.* Bijedić, T. et al. (Hrsg.): *Entrepreneurship Education.* Wiesbaden: Springer, S. 3-20.
- Kleine K., Giones F. & Tegtmeier S. (2019) The Learning Process in Technology Entrepreneurship Education – Insights from an Engineering Degree. *Journal of Small Business Management*, 57 (1), S. 94-110. <https://doi.org/10.1111/jsbm.12514>

- Lin T. & He Y. (2019) Does bilingual instruction impact students' academic performance in content-based learning? evidence from business school students attending bilingual and L1 courses. *Sustainability* (Basel, Switzerland), 11(1), 263. <https://doi.org/10.3390/su11010263>
- McCusker S. (2020) Everybody's monkey is important: LEGO® Serious Play® as a methodology for enabling equality of voice within diverse groups. *International Journal of Research & Method in Education*, 43 (2), S. 146-162. <https://doi.org/10.1080/1743727X.2019.1621831>
- Spiekermann S. (2019) *Digitale Ethik: ein Wertesystem für das 21. Jahrhundert*. München: Droemer.
- Spin-off Austria (2021) Spin-off Austria Dashboard 2021. Online: SOA\_Dashboard\_2021\_PDF\_RZ\_NEU3.indd (website-files.com)
- UN General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1, available at: <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> [accessed 21 December 2022]
- Zenk L., Primus D., Sonnenburg S. (2020) Alone but together: flow experience and its impact on creative output in Lego® Serious Play®. *European Journal of Innovation Management*, 25(6), S. 340-364. DOI10.1108/EJIM-09-2020-0362

# Session 3a

## Green Energy Lab – Upgrading Buildings

### **Integration einer reversiblen Brennstoffzelle in ein Smart Energy Building**

Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT  
Heschl / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT  
Banasiak / Montanuniversität Leoben / AT

### **Low-tech Gebäude oder doch Smart Building?**

Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT  
Haslehner / FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH / AT

### **Data-based Predictions of Load Profiles for Buildings for Flexible Optimization**

Poks, Löscher, Fallmann, Kozek / TU Wien / AT

### **Fault Detection applied on a real building**

Kührer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT  
Hengel, Gumhalter / AEE - INTEC / AT



# Integration einer reversiblen Brennstoffzelle in ein Smart Energy Building

N. Kirchknopf<sup>1)</sup>, Ch. Heschl<sup>1,2)</sup>, D. Banasiak<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Forschung Burgenland GmbH, Center for Building Technology, Pinkafeld, Austria*

<sup>2)</sup> *Fachhochschule Burgenland GmbH, Dep. Energy & Environment, Pinkafeld, Austria*

<sup>3)</sup> *Montanuniversität Leoben, Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Austria*

**ABSTRACT:** The need for enhanced integration of renewable energy in buildings is fundamental to the decarbonization of our future energy supply. This process necessitates the exploitation of different flexibility options. For short-term load and yield adjustments, intelligent energy management systems (EMS) equipped with heat pumps and battery storages are the established strategy. However, for long-term shifting, the use of advanced storage technologies is inevitable. Within the scope of the FIRST project, a holistic system solution that effectively addresses these diverse integration aspects is currently being developed.

FIRST offers a *Fully Integrated Reversible Solid Oxide Cell system*, which includes a reversible solid oxide cell (rSOC) with an EMS. The rSOC can switch between fuel cell mode, where electricity is generated, and electrolysis mode, where hydrogen is produced. With its high operating temperature range, the rSOC system presents an advantage by operating more efficiently and offering greater flexibility in fuel selection. The EMS allows the exploitation of short-term storage capacities of the building, so that a sequential cascaded utilization of the sector coupling technologies (heat pump - battery - rSOC) improves the overall performance. Therefore, rSOC systems in conjunction with EMS represent a promising technology for transition towards a sustainable energy future.

In this paper, different building integration scenarios based on photovoltaics (PV), heat pump, battery, EMS with short-term load-shifting capabilities and a rSOC-system with a hydrogen storage tank were analyzed. The loads were offered from a real operated building so that the impact of the users and a novel EMS with data driven predictive control algorithm were considered realistically. The rSOC system was taken into account with a simulation environment. Utilizing this approach, the enhancement in the degree of self-sufficiency for a building integrated rSOC solution was evaluated.

## 1 EINLEITUNG

Aufgrund der europäischen Klimapolitik und der Ukraine Krise hat die Integration von erneuerbaren Energiequellen und Energiespeichersystemen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Um eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Umsetzung der Klimaziele sicherzustellen, wurde in Europa die kaskadische Nutzungsstrategie als technologische Leitlinie etabliert. Demnach ist eine gestufte Nutzung der einzelnen Schlüsseltechnologien vorgesehen. Damit soll sichergestellt werden, dass die effizientesten Technologien zuerst zum Einsatz kommen und weniger effiziente Technologien erst dann genutzt werden, wenn die höherwertigen Optionen ausgeschöpft sind. Für die autarke Energieversorgung von Gebäuden ist daher eine strukturierte Kombination bestehend aus PV-Systemen mit Wärmepumpenanlagen, stationären Batteriespeichern, sowie ein intelligentes Energiemanagement (EMS) notwendig. Mit dem EMS können die Kurzzeitspeicherpotenziale des Gebäudes, der Pufferspeicher und die Batterie effizient genutzt werden. Saisonale Schwankungen zwischen PV-Ertrag und dem Energiebedarf können aber nicht ausgeglichen werden. In diesem Kontext spielt die Brennstoffzellentechnologie eine immer wichtigere Rolle, da sie eine effiziente und umweltfreundliche Möglichkeit zur Stromerzeugung

bietet. Insbesondere die reversible Brennstoffzelle (rSOC), die sowohl Strom als auch Wasserstoff erzeugen kann, hebt sich hervor. In diesem Paper wird daher die kaskadische Integration einer rSOC-Anlage in ein Gebäude analysiert. Als Referenzgebäude wird dabei das Test- und Versuchsgebäude ENERGETIKUM der Forschung Burgenland GmbH herangezogen. Das ENERGETIKUM besitzt ein entsprechendes EMS, sodass realitätsnahe Lastprofile unter Berücksichtigung der Kurzzeitspeicherungspotenziale und des Nutzer\*innenverhaltens für die simulationstechnischen Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden können.

## 2 TESTGEBÄUDE ENERGETIKUM

Das ENERGETIKUM (Abb. 1) ist ein zweistöckiges Bürogebäude mit einer Hauptnutzfläche von 601 m<sup>2</sup>. Es dient gleichzeitig als Living-Lab, was bedeutet, dass Forschung betrieben wird, während das Gebäude täglich als Bürofläche genutzt wird. Das Bürogebäude wurde im Jahr 2014 erbaut und erreichte 2015 eine vollständige Belegung.

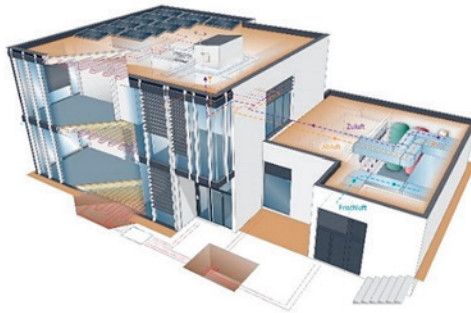


Abb. 1: Testgebäude ENERGETIKUM

Als Living-Lab bietet das ENERGETIKUM die Möglichkeit, nachhaltige Energietechnologien und -praktiken in einem realen Umfeld zu studieren und zu testen. Das Gebäude dient als Schaufenster für innovative energieeffiziente Gestaltung, Konstruktion und Betrieb und wird als Testobjekt für die Leistungsbewertung verschiedener Energiesysteme und Technologien genutzt.

Das ENERGETIKUM wird mit einer reversiblen Wärmepumpe beheizt und gekühlt. Am Flachdach befindet sich eine Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage), welche über eine Nennleistung von 19,8 kW<sub>peak</sub> verfügt. Das Gebäude ist mit einer Wetterstation am Dach und Strahlungssensoren an den Fassaden ausgestattet. Zur Ausnutzung der kurzzeitigen Speicherpotenziale ist das Gebäude mit einem datengetriebenen, prädiktiven Regelalgorithmus und der zugehörigen Infrastruktur ausgestattet. Dadurch wird der kaskadischen Nutzungsstrategie vollumfänglich Rechnung getragen.

## 3 RANDBEDINGUNGEN UND SIMULATIONSKONZEPT

Das Konzept (Abb. 2) sieht vor, dass die PV-Leistung in erster Linie direkt von den Verbrauchern und der Wärmepumpe genutzt wird. Bei einem Überschuss wird der elektrische Batteriespeicher beladen. Ist der Batteriespeicher geladen und es ist eine Überschuss-Leistung vorhanden, wird der Elektrolysemodus der reversiblen Brennstoffzelle gestartet und der produzierte Wasserstoff gespeichert. Bei einem Defizit an Leistung wird zuerst der Batteriespeicher entladen, bei entladener Batterie wird die Brennstoffzelle im Brennstoffzellenmodus betrieben. Die Abwärme der rSOC wird zu Heizzwecken in das Gebäudeheiznetz eingekoppelt.

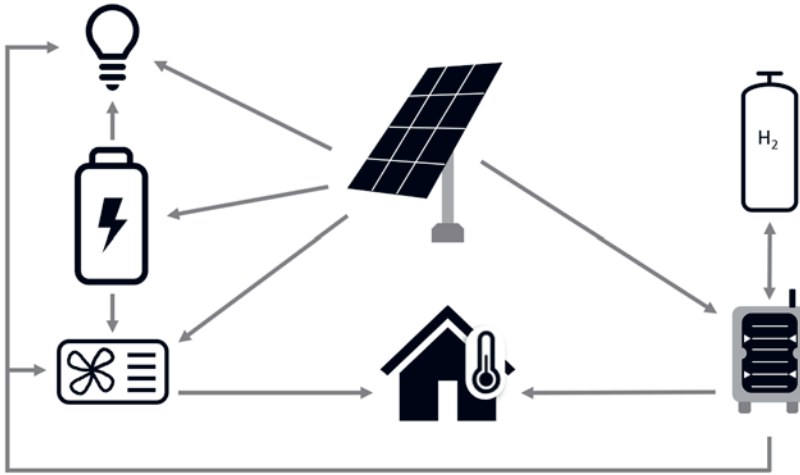


Abb. 2: Simulationskonzept

Für die Simulationen wurden folgende Messdaten herangezogen:

- Elektrisches Lastprofil des Gebäudes
- Elektrisches Lastprofil der Wärmepumpe mit EMS (vgl. PRELUDE 2023)
- Elektrisches Ertragsprofil der PV-Anlage
- Strahlungsdaten am Dach und an Fassaden
- Heizenergiebedarf des Gebäudes

Grundlegendes Know-how für die reversible Brennstoffzelle liefert das Projekt FIRST (FIRST 2021). Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung und der Aufbau eines kompakten rSOC-Systems mit einer Nennleistung von  $30 \text{ kW}_{el}$  im Elektrolyse-Betrieb und einer Nennleistung von  $10 \text{ kW}_{el}$  im Brennstoffzellen-Betrieb. Im Zuge des Projekts wird eine Komponentenkonfiguration entwickelt, welche einen effizienten und robusten Betrieb sicherstellt. Das Konzept des Simulationsmodells wurde aufbauend dem rSOC-System aus diesem Projekt erstellt.

## 4 MODELL PHOTOVOLTAIK

Das PV-Simulationsmodell basiert auf dem Ansatz von Duffie & Beckman (2013). Die Umsetzung des „1-Diode 5-Parameter Models“ erfolgte in Matlab. Hierbei werden die Standard-Test-Conditions (STC) des PV-Moduls als Referenzbedingungen herangezogen. Mithilfe dieser Bedingungen, den Strahlungsdaten, der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit vom Standort kann der Ertrag von PV-Anlagen bestimmt werden. Im Modell enthalten ist die Umrechnung von der horizontalen Globalstrahlung auf den gewünschten Neigungswinkel. Der Anteil der absorbierten und reflektierten Strahlung wird ebenfalls berücksichtigt.

Um einen möglichst hohen Autarkiegrad zu erreichen wurden bei der Simulation, neben der installierten PV-Anlage, weitere Gebäudeoberflächen für eine PV-Integration genutzt. In Summe wurde eine PV-Leistung von  $80 \text{ kW}_{peak}$  angenommen.

## 5 MODELL DES RSOC-SYSTEMS

Das modellierte rSOC-System (siehe Flussschema Abb. 3) umfasst sämtliche Komponenten, die für den effizienten und zerstörungsfreien Betrieb eines Hochtemperaturbrennstoffzellen-Stacks erforderlich sind. Der Stack wurde als datengetriebenes Modell von der AVL List GmbH basierend auf Fraunhofer IKTS bereitgestellt. Die Balance-of-Plant-Komponenten wurden auf thermodynamischen und physikalischen Prinzipien modelliert. Als Brenngas können Wasserstoff ( $H_2$ ) oder Erdgas (Methan:  $CH_4$ ) eingesetzt werden und im Elektrolysebetrieb wird Wasser ( $H_2O$ ) zugeführt. Wärmetauscher werden auf der Brenngas- und Luftseite zur Wärmerückgewinnung und Vorwärmung eingesetzt. Diese werden für die Off-Design Rechnung über Wärmeaustauschkoeffizienten spezifiziert. Der Rezirkulationspfad, zur Erhöhung der Brenngasausnutzung, umfasst einen Kondensator, ein Gebläse und eine Wärmerückgewinnung. In einem katalytischen Brenner wird im Brennstoffzellenbetrieb das Austrittsgas mit der Austrittsluft gemischt und vollständig verbrannt, um mehr Abwärme bereitstellen zu können. Für den Betrieb mit Erdgas wird ein vorgeschalteter  $CH_4$ -Reformer verwendet, der  $CH_4$  zu einem wasserstoffreichen Synthesegas im chemischen Gleichgewicht umwandelt. Für den thermisch stabilen Betrieb werden im Elektrolysebetrieb elektrische Heizer für das Brenngas und die Luft benötigt. Dabei wird die notwendige Austrittstemperatur innerhalb der zulässigen Systemgrenzen ( $\pm 100$  K zum Stack) in der Simulation bestimmt. Für den thermisch stabilen Brennstoffzellenbetrieb wird der Luftmassenstrom und die ausgekoppelte Wärmemenge am Hochtemperaturwärmetauscher (HT-WT) so bestimmt, dass sich die spezifizierte Temperatur des Stacks von  $750$  °C einstellt.

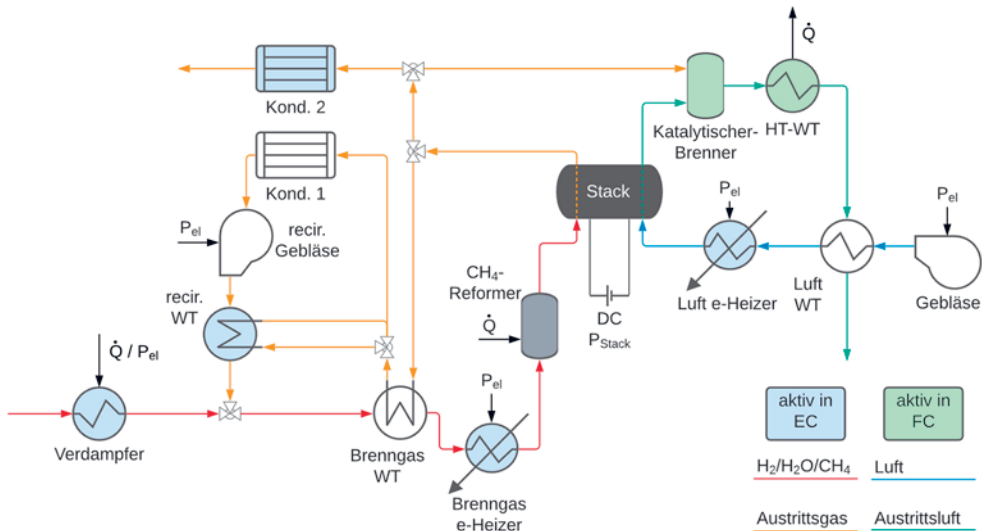


Abb. 3: Flussschema des simulierten rSOC-System-Modells. Komponenten, die nur in einem Betriebsmodus aktiv sind, wurden farblich hinterlegt

Die Details dieser Modellierung mit allen Spezifikationswerten wurden bereits von Paczona et al. (2023) beschrieben. Mit Hilfe dieses Modells wurden die Umwandlungskennfelder für Brenngas zu Strom und Wärme bestimmt, welche in der weiteren Untersuchung eingesetzt werden. Dafür wird die gesamte erzeugte bzw. benötigte elektrische Netto-Leistung, die Abwärme des Hochtemperaturwärmetauschers und des Abgases, in Abhängigkeit des Brenngasstromes, berechnet.

## 6 SIMULATION

Das Simulationsmodell beinhaltet einen Steuerungsalgorithmus, der für eine effiziente Nutzung des solaren Ertrages in Kombination mit Batteriespeicher, rSOC und Wasserstoffspeicher sorgt. Das Modell berechnet die Ladungs- und Entladungsleistungen auf Basis des Speicherzustands für den Batteriespeicher, sowie den Wasserstoffspeicher und der Ladungs- und Entladungsleistungsgrenzen. Es begrenzt auch den Speicherzustand zwischen einem Mindest- und einem Höchstwert und wandelt ihn in einen Prozentsatz (SoC: State of Charge) um. Der Algorithmus kann die Ladungs- und Entladeleistung der Speicher steuern, um die Leistung des PV-Speichersystems zu optimieren und gleichzeitig sicherzustellen, dass der Speicherzustand innerhalb definierter Grenzen bleibt.

In weiterer Folge wurde für die reversible Brennstoffzelle mit Wasserstoffspeicher eine Optimierungsstrategie für die Abwärmenutzung implementiert. Es werden eine Reihe von Parametern überwacht, um den optimalen Betriebsmodus zu bestimmen und die Leistung von verschiedenen Komponenten zu regeln.

Wenn nach der Batterie Überschuss an Energie vorhanden ist, wird die Elektrolyse gestartet und die Leistung des Elektrolyseurs wird durch eine Optimierung der Abwärmenutzung erhöht. Da der erzeugte Wasserstoff zur Speicherung verdichtet werden muss und dieser Prozess elektrische Energie benötigt, wird der elektrische Energiebedarf des Verdichters von der verfügbaren Leistung abgezogen. Dadurch ergibt sich eine Reduktion der verfügbaren Elektrolyseleistung und folglich verringert sich auch die produzierte Wasserstoffmenge. Wenn Energie benötigt wird, wird der Brennstoffzellenbetrieb aktiviert und die Leistung wird ebenfalls optimiert, um die Abwärme zu nutzen. Die Energie der Abwärmenutzung wird in das Gebäude zu Heizzwecken eingespeist, wodurch die Leistung der Wärmepumpe verringert werden kann.

Die Optimierung der Abwärmenutzung wird durch eine Abfrage realisiert, die eine iterative Berechnung durchführt, um die optimale Leistung zu ermitteln. Es wird die Brennstoffleistung in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung der Brennstoffzelle und die Abwärmeleistung des Elektrolyseurs in Abhängigkeit von seiner elektrischen Leistung berechnet. Diese Informationen werden verwendet, um die elektrische Leistung des Elektrolyseurs oder der Brennstoffzelle entsprechend zu erhöhen oder zu reduzieren, um das Optimum zu erreichen.

Für die Parameterstudie des Batteriespeichers und des Wasserstoffspeichers wurden jeweils die Speicherkapazitäten variiert. Die Autarkie wurde als Bewertungsgrundlage für den Nutzen der Gerätekonfiguration herangezogen. Die Berechnung des Autarkiegrads erfolgt mittels Gleichung 1.

$$\text{Autarkie} = 1 - \frac{\text{el. Energiebezug vom Netz}}{\text{el. Energiebedarf vom Gebäude}} \quad (1)$$

Dabei setzt sich der elektrische Energiebezug vom Netz aus den Energien von den Geräten, der optimierten Wärmepumpe, Pumpen abzüglich des PV-Ertrags, der Entladeleistung der Batterie und der elektrischen Brennstoffzellenleistung zusammen. Der elektrische Energiebedarf des Gebäudes beinhaltet die Geräte, die optimierte Wärmepumpe und die Pumpen.

## 7 ERGEBNISSE

Abb. 4 zeigt die Autarkie des Testgebäudes abhängig von der Kapazität des Batteriespeichers und der Kapazität des Wasserstoffspeichers. Das Gebäude mit Photovoltaik und ohne jeglichen Speicher erreicht einen Autarkiegrad von 43 %. Die maximal erreichte Autarkie beträgt 98 %.

Die ersten 20 kWh Batteriekapazität dienen bei dieser Systemkonfiguration als Kurzzeitspeicher zum Ausgleich zur Brennstoffzelle. Dieser Kurzzeitspeicher wird Entladen, wenn der Leistungsbedarf unter dem Leistungsstartwert der Brennstoffzelle liegt. Dem Diagramm ist auch zu entnehmen, dass mit Batteriespeicher und ohne Wasserstoffspeicher Autarkiegrade von 80 % erreicht werden können. Bei

einer Batteriespeicherkapazität von 80 kWh werden bereits 96 % vom Autarkieendwert (bei 200 kWh) erzielt, weshalb sich diese Größe für das Gebäude gut eignet.

Die Autarkiekennlinie von der Systemkonfiguration mit 15.000 kWh und 20.000 kWh Wasserstoffspeicher sind nahezu ident, d.h. das Maximum der Autarkie durch Wasserstoffspeicher ist mit 15.000 kWh bereits erreicht. Auch mit 10.000 kWh Wasserstoffspeicherkapazität nähert sich die Autarkiekurve mit steigender Batteriespeicherkapazität an die für diese Systemkonfiguration maximal erreichbaren Werte an. Zur Speicherung von 5.000 kWh würden 77 Stück 50-Liter-Wasserstoff-Gasflaschen bei 700 bar und 20 °C benötigt werden. Somit würden 15.000 kWh 229 Stück 50-Liter-Gasflaschen für Wasserstoff entsprechen.

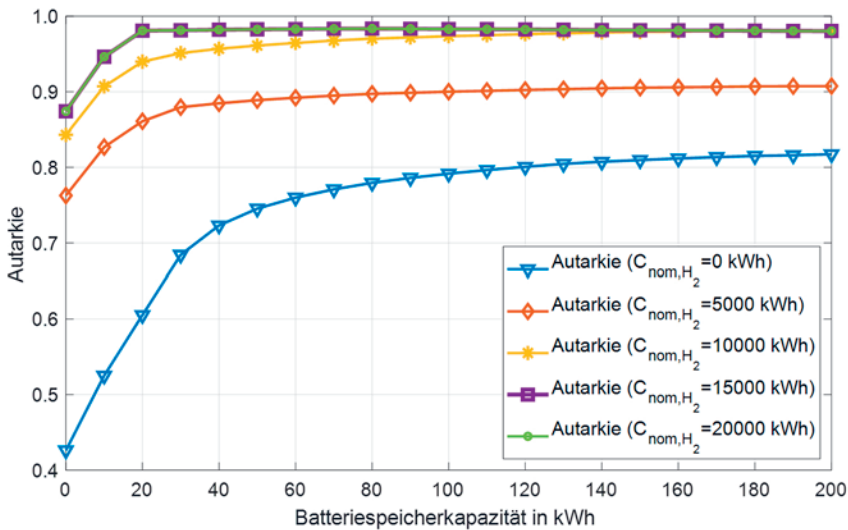


Abb. 4: Autarkiegrad des Systems in Abhängigkeit der Speichergröße des Batteriespeichers und des Wasserstoffspeichers

Dass eine hundertprozentige Autarkie nicht erreicht wird, ist auf die mit 10 kWel begrenzte Brennstoffzellenleistung zurückzuführen, welche zur Spitzenleistungsabdeckung nicht ausreicht.

Die Autarkie könnte weiters gesteigert werden, indem die Last im Gebäude verringert wird. In dem Zeitraum der Messdatenaufnahme wurde das Gebäude mit Leuchtstofflampen beleuchtet. Beispielsweise die Verwendung der LED-Technologie für die Beleuchtung führt zu einem geringeren Energiebedarf und somit können auch bei geringeren Speichergrößen höhere Autarkiegrade erreicht werden.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine kaskadische Integration einer rSOC-Anlage für das Test- und Versuchsgebäude ENERGETIKUM analysiert. Einen wesentlichen Schwerpunkt der simulationstechnischen Untersuchungen stellte dabei das Energiemanagement für die Steuer- und Regelung der einzelnen Subsysteme dar. Aufgrund der geringen Roundtrip-Effizienz der rSOC-Anlage ist die Steuerungsstrategie entscheidend für eine bessere Ausnutzung von erneuerbaren Energiequellen und die gleichzeitige Aufrechterhaltung einer zuverlässigen und stabilen Stromversorgung. Basierend auf der vorgeschlagenen Steuerungsstrategie wurden Parameterstudien zur Bewertung des Einflusses der Batterie- und Wasserstoffspeichergröße auf den Autarkiegrad durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Autarkiegrad durch verbesserte PV-Integration, Wärmepumpe, Batteriespeicher und intelligentes Energiemanagement bereits auf ca.

80 % erhöht werden kann. Dementsprechend liegt das weiterführende Potenzial durch den Einsatz von rSOC-System bei ca. 20 %. In zukünftigen Untersuchungen sollten daher auch alternative Langzeitspeicherlösungen wie z.B. die Verwendung von Biogasspeichern oder eFuels in Kombination von SOFC-Anlagen betrachtet werden.

## DANKSAGUNG

Die durchgeführten Untersuchungen wurden im Zuge des Projektes „Fully Integrated Reversible Solid oxide cell system“ durchgeführt und im Zuge des Programms Energieforschung 5. Ausschreibung (e!MISSION) mit der Projektnummer 871700, durch den „Klima- und Energiefond“ gefördert.

## LITERATUR

- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013) Solar engineering of thermal processes. 4th ed. Hoboken: John Wiley.
- FIRST (2021) Fully Integrated Reversible Solid Oxide Cell system. <https://energieforschung.at/projekt/fully-integrated-reversible-solid-oxide-cell-system/>
- Paczona D., Sejkora C., Kienberger T. (2023) Reversible solid oxide cell systems as key elements of achieving flexibility in future energy systems. In: Sitte W, Merkle R (eds) High-Temperature Electrolysis. IOP Publishing, 19-1-19-32. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3951-3ch19>.
- PRELUDE (2023) Prescient building Operation utilizing Real Time data for Energy Dynamic Optimization. <https://prelude-project.eu>

Kontakt:

Nora Kirchknopf  
Forschung Burgenland GmbH  
Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld  
Steinamangerstraße 21  
A-7423 Pinkafeld, Österreich  
[nora.kirchknopf@forschung-burgenland.at](mailto:nora.kirchknopf@forschung-burgenland.at)



# Low-tech Gebäude oder doch Smart Building?

H.C. Leindecker<sup>1)</sup>, R. Haslehner<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> FH OÖ Studienbetriebs GmbH, Fakultät für Technik & Angewandte Naturwissenschaften, Wels

<sup>2)</sup> FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH, Wels

**ABSTRACT:** As part of an interdisciplinary project at the University of Applied Sciences Upper Austria, a modular residential building was investigated and evaluated for its energy parameters, ecological aspects and possible optimization potential in the utilization phase. Furthermore, different building services systems were compared with each other and additionally compared with the requirements for a klimaaktiv declaration. To evaluate the environmental impact, the building's component constructions and the emissions during the utilization phase were examined. Another part dealt with the optimization potential of the existing building services. For this purpose, historical energy data of the building and the photovoltaic system were evaluated. A detailed examination of the consumption data clearly showed the optimization potential for the operation of the building. By upgrading the building with a smart home system and the associated centralization of energy management, consumption could be shifted to times of PV overproduction, thereby increasing the system's own consumption and simultaneously reducing CO<sub>2</sub> emissions in the utilization phase. To determine the potential of consumption automation, various building simulation models are currently being studied and evaluated.

## 1 EINLEITUNG

Im Zuge eines fächerübergreifenden Projektes des Studienganges Angewandte Energietechnik an der Fachhochschule Oberösterreich, Campus Wels, wurde ein bereits bestehendes Wohngebäude im Zentralraum von Oberösterreich auf dessen Energiekennwerte, ökologische Aspekte sowie mögliche Optimierungspotentiale in der Betriebsführung untersucht und bewertet. Hierbei lag der Fokus vor allem im Vergleich der Umweltwirkungen unterschiedlicher Gebäudetechniksysteme und das diesbezügliche Potential von intelligenter Automatisierung. Jedenfalls sollte der Frage nachgegangen werden, was ein suffizient „smarter“ Gebäude ausmacht (Leindecker et al. 2023).

Zunächst wurde eine Auswahl für passende Heizsysteme im Untergeschoss getroffen. In weiteren Schritten wurde der Energiebedarf des Hauses in der Errichtung betrachtet, verschiedene Heizsysteme in Bezug auf Emissionen analysiert und das Gebäude auf einen gesamten Lebenszyklus, sowohl in der Errichtung als auch in der Nutzung betrachtet. Außerdem wurde analysiert, welche Förderungen es gibt und ob ein Batteriespeicher wirtschaftlich Sinn ergibt. Es wurde auch betrachtet, welche Optimierungsmöglichkeiten es durch eine Lastverschiebung in Zeiten von PV-Überproduktion gibt und ob ein E-Auto als Speicher für bidirektionales Laden sinnvoll wäre. Letztlich sollte eine Smart-Home-Lösung gefunden werden, in welche sich Verschattung, Heizungssteuerung, Energiemanagement integrieren lassen.

## 2 GEBÄUDEBESCHREIBUNG

### 2.1 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG

Das untersuchte Wohngebäude (Abb. 1) befindet sich in der Gemeinde Scharten auf einer Seehöhe von etwa 397 m und wurde auf einem nach Westen orientieren Hang errichtet. Die Konstruktion der Gebäudehülle wurde grundsätzlich als Holz-Modulbauweise geplant um dem Gebäude eine bestimmte Flexibilität zu geben. Aufgrund der Hanglage wurde das Mauerwerk im Untergeschoss auf der Hang-

seite in Massivbauweise aus Stahlbeton mit entsprechender Dämmung ausgeführt. Die zur Gartenseite gerichteten Fassaden im Untergeschoss wurden zwischen den Betonsäulen mit einer Holzkonstruktion ergänzt. Das Erdgeschoss wurde vollständig in Holz-Modulbauweise („microHOME“ der Fa. Genböck als „extended tiny house“) aufgesetzt und könnte somit jederzeit abgebaut und andernorts wieder neu aufgestellt werden.

Im Erdgeschoss des Gebäudes befindet sich ein großer und offener Wohn-Essbereich inklusive Küche und einer großen Glasschiebetür zur Terrasse. Neben dem Eingangsbereich befindet sich ebenfalls noch ein Schlafzimmer sowie ein Bad und WC auf dieser Ebene. Das Untergeschoss bietet einen weiteren größeren und hellen Raum, welcher als Büro oder auch Gästezimmer genutzt werden kann. Über den Vorraum im Untergeschoss gelangt man sowohl auf die Terrasse und weiter in den Garten sowie auch zu einem zweiten Bad mit WC oder dem Lagerraum. Ein kleiner Technikraum befindet sich ebenfalls noch im Untergeschoss. Das Wohngebäude besitzt somit eine konditionierte Brutto-Grundfläche von 175m<sup>2</sup> sowie ein konditioniertes Brutto-Volumen von 548m<sup>3</sup> und eine Kompaktheit (A/V) von 0,81 1/m.

Das Gebäude wurde zudem im Jahr 2019 mit einer klimaaktiv Deklaration in Bronze ausgezeichnet.



Abb. 1: Wohngebäude in Modulbauweise (Foto: Seifriedsberger/Genböck)

## 2.2 THERMISCHE GEBÄUDEHÜLLE

Durch die Hanglage wurde der erdanliegende Fußboden mit einem U-Wert von 0,178 W/(m<sup>2</sup>K) sowie die beiden in den Hang reichenden erdanliegenden Wände (U-Wert 0,163 W/(m<sup>2</sup>K)) in Massivbauweise aus Stahlbeton gefertigt und entsprechend gedämmt. Die Richtung Garten orientierten Fassaden im Untergeschoss wurden lediglich mit Stahlbetonsäulen gestützt und mit einer Holzleichtbaukonstruktion (U-Wert 0,161 W/(m<sup>2</sup>K)) ausgefüllt und gedämmt.

Die Modulbauweise des Erdgeschosses besteht aus einer vollständigen Holzkonstruktion mit Holzfaserdämmung. Die Außenwände besitzen dabei einen U-Wert von 0,182 W/m<sup>2</sup>K und das Flachdach einen U-Wert von 0,114 W/(m<sup>2</sup>K) sowie die warme Zwischendecke zum Untergeschoss einen U-Wert von 0,191 W/(m<sup>2</sup>K). Als Fenster wurden Holz-Alu Fenster eingesetzt mit

einem Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases von  $U_g 0,52 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und des Rahmens  $U_f$  von  $0,86 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Für die gesamte Gebäudehülle konnte somit ein mittlerer U-Wert von  $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden. Eine durchgeführte Blower-Door Messung am Gebäude zeigte eine Luftdichtheit der thermischen Gebäudehülle von  $0,6 \text{ l/h}$  und erfüllt somit sogar die Passivhaus Anforderungen. Der Referenz-Heizwärmebedarf  $\text{HWB}_{\text{Ref,RK}}$  nach OIB RL6 2015 beträgt für das Gebäude  $39,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

### 2.3 TECHNISCHE GEBÄUDEAUSSTATTUNG

Bei der Errichtung des Gebäudes wurde speziell auf eine einfache und benutzerfreundliche technische Gebäudeausstattung im „low-tech“ Ansatz geachtet. Für die Raumwärme im Obergeschoss sorgt ein  $8 \text{ kW}$  Pelletofen, der sich im großen Wohn-Essbereich befindet. Dieser kann sowohl Vor-Ort als auch über eine App gesteuert werden. Im Vorraum des Untergeschosses sowie im Gästezimmer wurden agile Infrarotpaneele mit einer Leistung von je etwa  $730 \text{ W}$  angebracht. Diese können über die Solltemperatur als auch über Zeitfunktionen ein- und ausgeschaltet werden. Eine Wohnraumlüftung sorgt für einen regelmäßigen Luftwechsel im Gebäude mit Wärmerückgewinnung. Das Lüftungsgerät setzt dabei ein Luftvolumen von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  um bei einem Wärmebereitstellungsgrad von  $87 \%$ .

Die Wärmebereitstellung des Brauchwassers erfolgt elektrisch über einen Heizstab im Boiler. Der größte Anteil der hierfür benötigten Energie kann jedoch von der am Dach errichteten  $6 \text{ kW}_p$  Photovoltaikanlage mit Ost-West Orientierung und einem  $5 \text{ kW}$  Fronius Symo Hybrid Wechselrichter in Kombination mit dem Fronius Ohmpiloten selbst erzeugt und gedeckt werden. Für die Bedienung und zur automatischen Beschattung der Raffstores im Wohn-Essbereich sowie im Schlafzimmer wurde ein Funksystem mit Wetterstation eingesetzt. Hierdurch ist ein automatisches Öffnen und Schließen über die Einstrahlung möglich.

Alle genannten Systeme arbeiten im sogenannten „Stand-alone-Betrieb“ und haben keine Schnittstellenverknüpfungen zueinander. Jedes Gerät besitzt zudem eine separate App und kann hierüber bedient und konfiguriert werden.

## 3 ENERGETISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

### 3.1 ENERGIEAUSWEISVARIANTEN

Für das im Jahr 2018 errichtete Gebäude wurde ein Energieausweis (EAW) auf Basis der dazumals geltenden OIB Richtlinie 6 2015 erstellt. Zu Vergleichszwecken wurde dieser nochmals neu mit der aktuell geltenden OIB RL6 2019 berechnet, sowie zwei weitere Varianten, bei welchen lediglich die Bereitstellung der Raumwärme einmal komplett mit Infrarotheizungen und ein weiteres Mal mit Wärmepumpe abgeändert wurde. Zusätzlich erfolgte noch ein Abgleich der Energiekennwerte mit den Mindest-Anforderungen für die klimaaktiv Kriterien in der Kategorie A – Energie und Versorgung. Dabei wurde der gültige EAW für die OIB RL6 2015 mit dem Kriterienkatalog 2017 und die Vergleichsvarianten für die OIB RL6 2019 mit dem Kriterienkatalog 2020 abgeglichen (klimaaktiv 2017; klimaaktiv 2020).

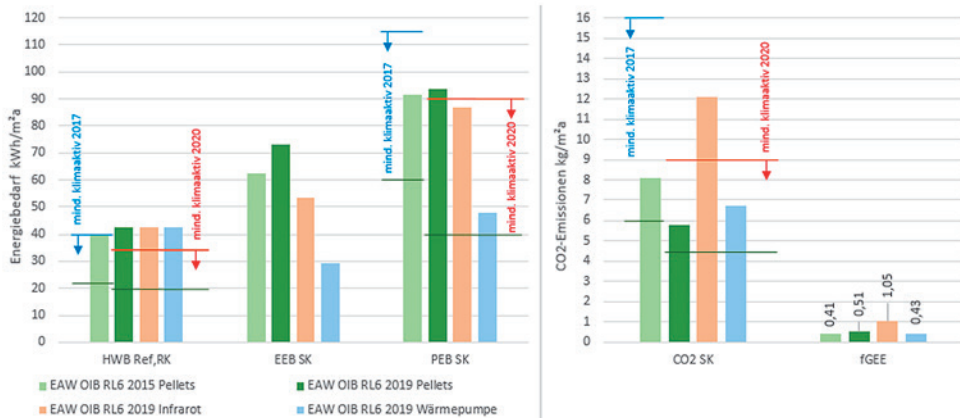


Abb. 2: Vergleich der Energiekennwerte aus den Energieausweisen für unterschiedliche Heizungsvarianten auf Basis der OIB RL6 2015 und 2019 sowie Beurteilung der Mindest-Anforderungen nach klimaaktiv Kriterienkatalog 2017 und 2020

In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Vergleichsvarianten sehr deutlich dargestellt. Aufgrund einiger Unterschiede bei den Berechnungsgrundlagen zwischen der OIB RL6 2015 und 2019 wie etwa der Anhebung der Soll-Innenraumtemperatur von 20 °C auf 22 °C, steigerte sich der  $HWB_{Ref,RK}$  für das Gebäude gering von 39,9 kWh/(m²a) auf 42,5 kWh/(m²a). Da jedoch die Mindest-Anforderungen im klimaaktiv Kriterienkatalog 2020 verschärft wurden, dürfte dieses Gebäude jedoch nur mehr einen maximalen  $HWB_{Ref,RK}$  von 35,4 kWh/(m²a) aufweisen. Mit einem aktuellen EAW der OIB RL6 2019 wäre daher für keine der Vergleichsvarianten eine positive klimaaktiv Deklaration möglich (OIB 2015; OIB 2019).

Ebenfalls veränderten sich die Mindest-Anforderungen des aktuellen klimaaktiv Kriterienkatalogs 2020 für den Primärenergiebedarf (PEB) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Erreichte der PEB aus der OIB RL6 2015 noch sehr leicht die Mindest-Anforderungen im Kriterienkatalog 2015, so kann dieser mit der OIB RL6 2019 für die Pellet-Varianten die verschärften Anforderungen im Kriterienkatalog 2020 nicht mehr erfüllen. Ein Grund hierfür liegt unter anderem auch in den veränderten Konversionsfaktoren der aktuellen OIB RL6 2019.

Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgte eine deutliche Verschärfung der Mindest-Anforderungen im Kriterienkatalog 2020 um fast die Hälfte gegenüber dem Kriterienkatalog 2017. Dies stellt jedoch für die Vergleichsvarianten der Pelletheizung und der Wärmepumpe auch im aktuellen EAW mit OIB RL6 2019 kein Problem dar. Für ein Gebäude mit Infrarotheizung würde in diesem Fall jedoch keine Deklaration möglich sein. Ebenso zeigt die Infrarotvarianten für den  $f_{GEE}$  einen deutlich zu hohen Wert von 1,05 und würde somit nicht einmal die Anforderungen im EAW erfüllen.

Um die Veränderungen für den PEB und die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der geänderten Konversionsfaktoren bei den unterschiedlichen Energieträgern in der OIB RL6 in Hinblick auf das eingesetzte Raumheizungssystem zu verdeutlichen, wurden auf die neu erstellten Vergleichsvarianten der OIB RL 2019 ebenfalls die Konversionsfaktoren der OIB RL6 2015 angewendet (siehe Abb. 3). Hierbei wurde zunächst ein fiktiver Endenergiebedarf (EEB) „nur Heizen“ aus dem EAW errechnet.

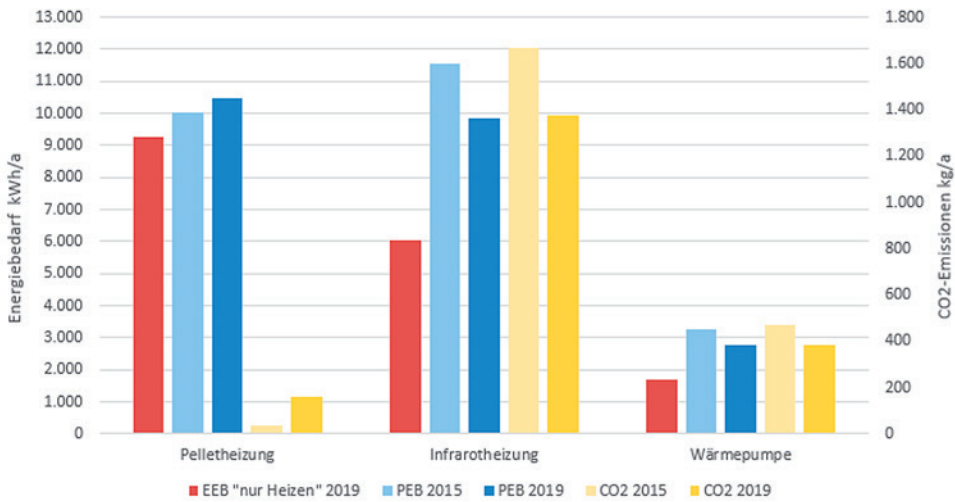


Abb. 3: Bewertung der Energiekennwerte für die unterschiedlichen Heizungsvarianten unter Berücksichtigung der Konversionsfaktoren aus der OIB RL6 für 2015 und 2019

Die mit Biomasse betriebene Pelletheizung verschlechtert sich für den PEB aufgrund der neuen Konversionsfaktoren leicht. Beim CO<sub>2</sub> fällt diese Verschlechterung noch deutlicher aus, es ist diese Variante verglichen mit den beiden anderen Varianten jedoch klar besser. Die Infrarotheizung zeigt für den benötigten EEB „nur Heizen“ um etwa ein Drittel weniger als die Pelletheizung, jedoch sind aufgrund der ungünstigen Konversionsfaktoren für den Strom (Liefermix) die Werte für PEB und CO<sub>2</sub> relativ hoch. Interessant ist jedoch, dass der PEB der Infrarot-Variante sogar etwas besser abschneidet als der PEB der Pellets-Variante! Mit der OIB RL6 2019 wurden die Konversionsfaktoren für Strom sichtlich verbessert. Dies verhält sich bei der Wärmepumpe in gleicher Weise, doch kann aufgrund der günstigen JAZ der Wärmepumpe der benötigte EEB „nur Heizen“ nochmals deutlich reduziert werden.

### 3.2 ÖKOLOGISCHE BERECHNUNGEN

Zur Betrachtung der ökologischen Aspekte des Gebäudes wurde versucht die äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Gebäudeerrichtung sowie der Gebäudenutzung auf 50 Jahre zu bestimmen. Die Berechnung der Emissionen bei der Gebäudeerrichtung wurde dabei mit dem online Tool eco2soft durchgeführt. Für das Gebäude wurde somit der Ökoindex (OI3) für die Bilanzgrenze 3 (BG3) der Version 5.0 berechnet. Hierbei wird die vollständige Gebäudehülle inklusive Zwischendecken und Innenwänden in den drei ökologischen Kennzahlen abgebildet. Die technische Ausstattung eines Gebäudes, wie etwa das gewählte Heizungssystem oder auch eine Photovoltaikanlage werden hierin jedoch noch nicht berücksichtigt. Diese werden erst ab der BG5 miteinberechnet, welche zukünftig mit Sicherheit eine immer wichtigere Bedeutung erhalten wird.

Für die Emissionen während der Gebäudenutzung wurden die CO<sub>2</sub>-Kennwerte aus den jeweiligen Energieausweisen auf 50 Jahre hochgerechnet. Um den Einfluss des gewählten Raumheizungssystems auf die Gesamtemissionen noch einmal zu verdeutlichen, wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen für „nur Heizen“ aus der Abbildung 3 ebenfalls auf 50 Jahre hochskaliert und in der Abb. 4 ergänzt.

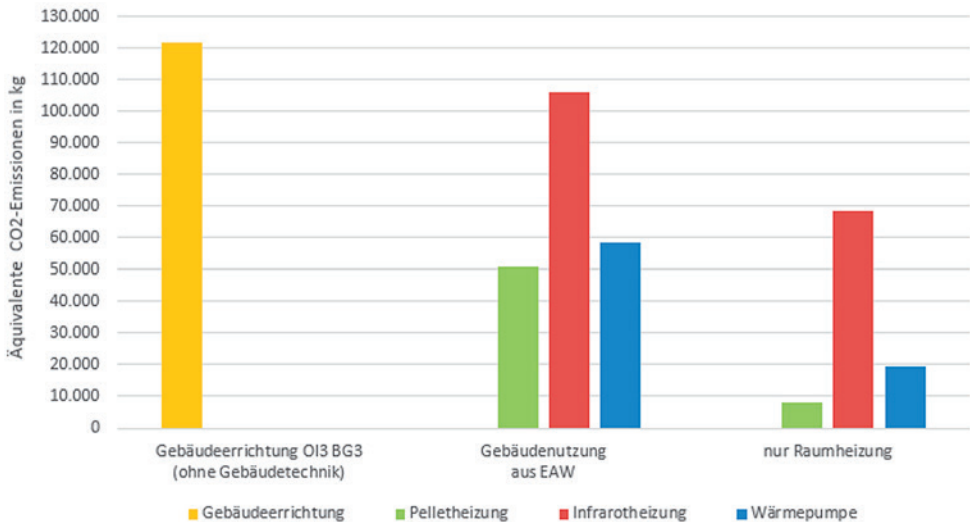


Abb. 4: Bewertung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Gebäudeerrichtung und Gebäudenutzung für verschiedene Heizungsvarianten für 50 Jahre

Wie hier ersichtlich ist, weist die Gebäudeerrichtung (ohne Gebäudetechnik) die größten CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf 50 Jahre auf. Jedoch sind die Emissionen während der Gebäudenutzung je nach gewähltem Heizungssystem nicht zu vernachlässigen. Gerade eine direkt mit Strom betriebene Infrarotheizung zeigt mit dem Strom Liefermix der OIB RL6 2019 sehr hohe Emissionswerte auf 50 Jahre. Selbst eine Wärmepumpe hat noch einen etwas höheren Wert bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber der Pelletheizung. Wird der benötigte Strom für die Heizsysteme lediglich aus dem vorgelagerten Stromnetz bezogen, so ist diese Berechnung durchaus plausibel.

Wird jedoch der Strom für die Infrarotheizung oder der Wärmepumpe aus einer eigenen Photovoltaikanlage gewonnen und direkt verwendet, so müssten die oben berechneten Emissionswerte nochmal detailliert betrachtet werden. Eine Gebäudeautomatisierung kann hierbei zusätzlich helfen, die geringere Produktion der PV-Anlage in den Übergangszeiten sowie den Wintermonaten dennoch möglichst effizient an das Heizungssystem weiterzuleiten und somit die Eigenstromnutzung nochmal zu erhöhen.

## 4 OPTIMIERUNGSPOTENTIALE DER GEBÄUDETECHNIK

### 4.1 SITUATIONSDARSTELLUNG

Neben der Pelletheizung wird der restliche Anteil des Energiebedarfs im Gebäude mit elektrischer Energie gedeckt. Hierfür liefert die eigene PV-Anlage am Dach einen Jahresenergieertrag von etwa 6.300 kWh/a bei einem gleichzeitigen Jahresverbrauch des Gebäudes von etwa 4.300 kWh/a. Der Eigenverbrauchsanteil liegt aufgrund des vorhandenen Ohmpiloten zur Warmwasserbereitung bereits bei einem recht hohen Anteil von etwa 30,1 %. Ohne Ohmpilot würde dieser Wert auf etwa 15 % absinken. Zur erwähnen ist, dass der Eigenverbrauchsanteil im EAW der OIB RL6 2019 ebenfalls bereits automatisch mit recht hohen 32 % berücksichtigt wird.

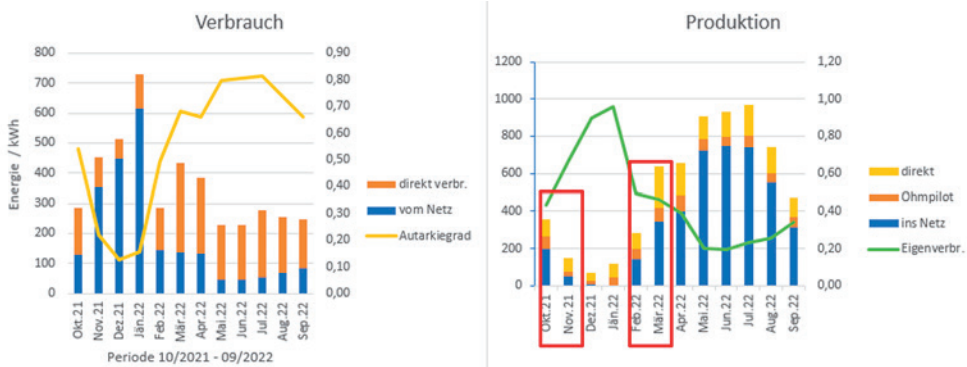


Abb. 5: Produktion und Verbrauch (Monitoring) des erzeugten PV-Stroms 10/2021- 9/2022

Die Abb. 5 zeigt den bereits hohen Eigenverbrauchsanteil für Dezember und Jänner, auch bedingt durch die geringe Einstrahlung. Gleichzeitig zeigt diese aber auch ein deutliches Potential speziell für die Übergangsmonate Oktober und November sowie Februar und März. Eine Verschiebung und Automatisierung der Verbräuche sowie der Einsatz eines Batteriespeichers sollten den Eigenverbrauch nochmal steigern und dabei gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Gebäudenutzung weiter senken.

#### 4.2 BATTERIESPEICHER

Durch Simulationen mit der Software PV\*Sol, konnte in Kombination mit einem 5,2 kWh Batteriespeicher eine Steigerung des Eigenverbrauchsanteils von 30,1 % auf 44,3 % gezeigt werden. Der Einsatz eines noch größeren Speichers zeigt jedoch bei der derzeitigen Nutzung nur mehr einen geringen Anstieg des Eigenverbrauchs. Infrage kommen daher nur kleinere Speicher wie der LG Chem Resu7H oder der BYD HVM 8,3, welche zudem vom bestehenden Wechselrichter unterstützt werden. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit zeigen beide Batteriespeicher jedoch sehr hohe Amortisationszeiten zwischen 13 und 20 Jahren, bei einer zu erwartenden Lebensdauer der Speicher von etwa 20 Jahren. Alleine aus diesem Grund sollten zunächst die Möglichkeiten der Verschiebung der Verbräuche zu den Ertragszeiten untersucht werden (Leindecker et al. 2023).

#### 4.3 VERSCHIEBUNG DER VERBRÄUCHE

Detaillierte Auswertungen der Tagesverbräuche zeigten sehr rasch die Optimierungspotentiale wie am Beispiel der Abb. 6 ersichtlich. Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich um einen Tag ohne Anwesenheit im Gebäude handelt und somit lediglich automatische Schaltvorgänge stattfanden. Da jedoch die einzelnen Lasten im Gebäude wie etwa die IR-Paneele oder der Ohmpilot über keine zentrale Kommunikation verfügen, können sich deren Energiebedarf überlagern und somit die Produktion übersteigen. Ebenso kommt es zu hohen Leistungsbezügen außerhalb der PV-Produktion und an anderen Zeiten zu großen Einspeisungen in das Netz. Gerade im Übergangsmonat März könnte daher die selbst produzierte Energie effizienter genutzt werden, so auch für die IR-Raumheizung im Untergeschoss.

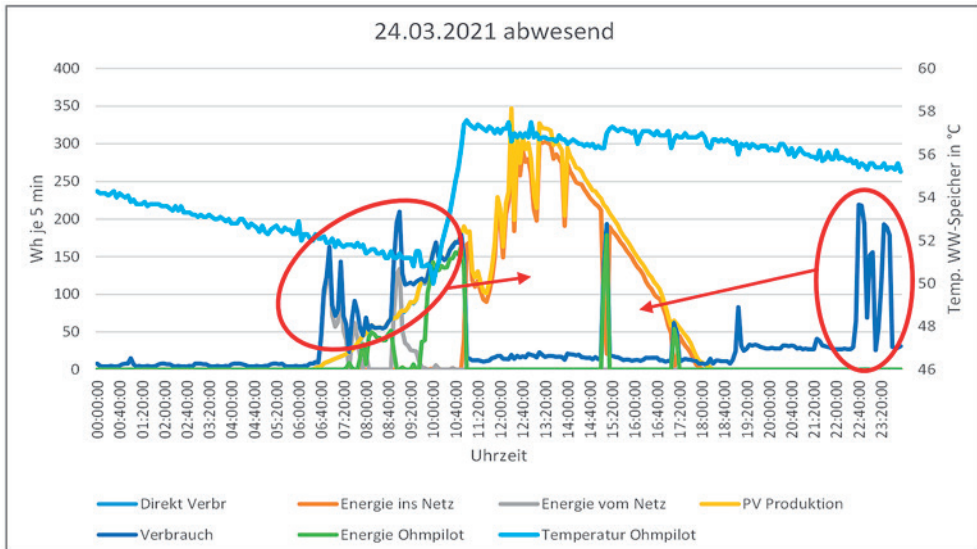


Abb. 6: Beispiel zur Optimierung der Eigenstromnutzung durch Verschiebung der Verbräuche

Die Zusammenführung der einzelnen elektrischen Verbraucher bzw. Systeme in ein zentrales und intelligentes Energiemanagement stellt somit einen wichtigen Schritt in Richtung Eigenverbrauchssteigerung für das Gebäude dar.

#### 4.4 AUTOMATION

Der Grad der Automatisierung in einem Gebäude hängt zum einen von der Anzahl der integrierten Einzelsysteme und zum anderen von der Verknüpfung und Intelligenz der Ansteuerungen dieser Systeme ab. Eine sehr vereinfachte Ansteuerung zur Verschiebung der Verbräuche zu den PV-Produktionszeiten kann bereits mit einer Zeitsteuerung und Staffelnung der Verbraucher erfolgen. Intelligente Steuerungen sollten hingegen verschiedenste Eingangsparameter wie etwa aktueller PV-Überschuss, Anwesenheit, Temperatursollwerte, Wetterbedingungen oder eventuell auch Wetter-Forecasts und aktuelle Energiekosten berücksichtigen können und die Verbraucher dementsprechend optimal ansteuern.

Bereits in der EU-Gebäuderichtlinie von 2018 (EPBD 2018) wurde ein sogenannter „Smart Readiness Indicator“ (SRI) für Gebäude eingeführt um die Gesamtenergieeffizienz und -leistung zu verbessern. Ein wichtiger Kernpunkt des „Intelligenzfähigkeitsindikators“ sollte dabei die „Fähigkeit, die Gesamtenergieeffizienz und den Betrieb des Gebäudes aufrechtzuerhalten, indem der Energieverbrauch, beispielsweise durch die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, angepasst wird“ darstellen (Knotzer et al. 2020).

Mit dem neuen klimaaktiv Kriterienkatalog 2020 können nun auch Automatisierungssysteme, welche zur Steigerung der Energieflexibilität im Gebäude beitragen, entsprechend bepunktet werden. Im Kriterium B.2.1.3 – Zusätzliche Regelsysteme zur weiteren Optimierung, werden etwa die Berücksichtigung der Wetterentwicklung sowie die Schaltung zusätzlicher Verbraucher nach netzdienlichen Parametern honoriert (klimaaktiv 2020).

Die genannten und angestrebten Optimierungspotentiale durch eine Automatisierung der Verbräuche, werden für das betrachtete Gebäude aktuell noch zusätzlich in verschiedenen Gebäudesimulationsmodellen detailliert untersucht.

#### 4.5 SYSTEME ZUR AUTOMATION

Für das Gebäude wurden unterschiedliche Smart Home Systeme zur (Teil-)Automatisierung der vorhandenen Einzelsysteme verglichen und bewertet. Dabei sollte vor allem auf eine einfache Nachrüstbarkeit sowie Flexibilität des Systems geachtet werden. Näher betrachtet wurden schließlich das System Brain Cube der Firma Homee sowie die Loxone Air Technologie der Firma Loxone. Aufgrund zurzeit fehlender und relevanter Komponenten im Homee System wird das Loxone System trotz etwas höherer Kosten vorgeschlagen. Die Grundlage bildet hierbei der Loxone Miniserver GO, welcher die markeninterne „Air“ Funktechnologie bereits mit an Bord hat. Zudem bietet das System eine Vielzahl an eigenen Komponenten sowie Anbindungsmöglichkeiten zu Drittanbietern. Hierdurch gestaltet sich das System im Einsatz sehr flexibel und zukunftsorientiert. Durch die sehr freie Programmierumgebung können zudem so gut wie alle Automatisierungsvorgänge im Gebäude umgesetzt werden.

### 5 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das 2018 errichtete Gebäude würde den neuen klimaaktiv Mindest-Anforderungen ab 2020 nicht mehr entsprechen. Der Vergleich von Varianten für das Heizungssystem mit den Konversionsfaktoren der OIB RL 6 2019 zeigte interessante Entwicklungen im Detail. Tendenziell werden Heizungssysteme auf Strombasis (Wärmepumpe, Infrarot) aufgrund der steigenden Anteile erneuerbarer Energie im Strommix in Zukunft immer besser abschneiden, wobei die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Werte hier sinnvoller erscheint als der Vergleich der PEB-Werte. Bei „Nur-Strom“-Gebäuden erscheint aber die smarte Regelung der Systeme ein entscheidender Faktor zu werden. Beispielsweise ist für die Optimierung und zur Steigerung der Eigenstromnutzung durch die PV-Anlage ein minimaler Grad an Automatisierung mit intelligenter Regelung sehr sinnvoll bzw. notwendig.

### LITERATUR

- Leindecker H. C. (Hrsg.), Füreder M., Peneder G., Seiberl J., Stefan Wageneder St. (2023) Smart Building 2.0, Exemplarische Optimierung eines Einfamilienhauses in ausgewählten Teilbereichen. Projekt-Bericht vom WS 2022/23 Studiengang Angewandte Energietechnik. FH OÖ Campus Wels.
- klimaaktiv (2017) klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten 2017, Neubau und Sanierung. 4. Auflage. Wien, Februar 2017. ISBN: 978-3-903129-27-6 (Broschüre)
- klimaaktiv (2020) klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten 2020, Neubau und Sanierung. Wien, 2020.
- OIB (2015) Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz), Ausgabe März 2015, 330.6-009/15
- OIB (2019) Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz), Ausgabe April 2019, 330.6-026/19
- Knotzer A., Fechner J., Zelger T., A. Berger A. (2020) Smart Readiness Indikator: Bewertungsschema und Chancen für intelligente Gebäude (SRI-Austria), Bericht aus Energie- und Umweltforschung. Schriftenreihe 8/2020 Wien, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg).

Kontakt Daten Autor(en):

FH-Prof. Arch. Dipl.-Ing. Dr. Herbert C. Leindecker

Stelzhamerstraße 23

4600 Wels

Email: herbert.leindecker@fh-wels.at



# Data-based Predictions of Load Profiles for Buildings for Flexible Optimization

A. Poks, M. Lösch, M. Fallmann, M. Kozek

*Institute for Mechanics and Mechatronics, Technische Universität Wien, Vienna, Austria*

**ABSTRACT:** The flexible usage of modern buildings results in varying load profiles. This means that internal loads, which are often critical for both energy consumption and the thermodynamics of the building, can be of the type of residential or commercial buildings, or a combination of both. Nevertheless, typical usage patterns arise in residential and non-residential buildings. These electric load profiles can be measured, and based on this measurement data, dynamic models can be designed that serve as a basis for prediction. Such predictions, which are adapted to the specific use case, can subsequently be used for optimized operation management (heating/air conditioning, storage management, sector coupling, etc.). In the present work, dynamic mode decomposition is used for data-driven modeling and predicting the load profiles of buildings with mixed usage. This enables adaptive yet reliable predictions in buildings with time-varying mixed usage. Utilizing the structure of a Takagi-Sugeno fuzzy system for energy management a seamless weighting between residential and commercial usage becomes possible.

## 1 INTRODUCTION

Since people generally spend a large part of their time indoors, the energy consumption of buildings is increasing rapidly. The same holds for production facilities. The amount of electricity fed into the power grid must always match the amount consumed so that frequency and voltage remain stable. Load data is, therefore critical for planning power distribution networks and optimal production capacity. Accurate knowledge of building load is equally crucial if small distributed energy technologies are to be optimally sized. As a result, policymakers are encouraging the development of effective approaches to quantify the load impacts of demand response programs. Modern model-predictive control needs predictions of all disturbances, like outdoor temperature, solar radiation, and electrical load profile for optimal system management. There are numerous methods for estimating energy use in buildings. The various methods can be broadly classified into three groups: statistical regression analysis, intelligent computer systems, and energy simulation. In this paper, an adaptive computer algorithm is presented that can flexibly predict electrical energy consumption in both residential and other buildings based on dynamic mode decomposition (DMD).

In a previous work (Killian & Kozek 2019), an electric load prediction method for a smart home was presented. It is based on the feature extraction from historic data, clustering of different load profiles, and a Kalman filter bank with a hypothesis test to select the currently valid profile. The load profile is consequently also used for determining the optimal heating strategy. The method is self-learning, i.e., after some time different features are detected in the data and can be successfully detected. The main disadvantage is the strictly switching behavior, meaning only a single specific load profile can be active. In the approach presented here, the case of mixed residential and non-residential usage of a building should be covered. This means that at the same time different proportions of the individual load profiles can add up to the effective total load profile. In order to cope with this problem, dynamic mode decomposition (DMD) is utilized here. DMD is a well-established method to 1) parametrize a linear dynamic model from on-line data and 2) use this model for predictions of future trajectories. If multiple models are identified, an internal multiple model (IMM) approach can be utilized to select the most probable

model as the active one. Alternatively, using a Takagi-Sugeno fuzzy structure a continuous blending of the model outputs can be achieved, thus obtaining near-optimal control of non-linear systems (Böhler et al. 2020). This formulation allows for seamless superposition of residential and non-residential load profiles based on the evaluation of online data.

In Luo & Oyedele (2022), an artificial neural network is designed to predict the electric power consumption in buildings with a moving horizon. A number of 33 input variables is utilized to predict the load profile. The authors show that an  $R^2$  of more than 97% can be consistently obtained. However, the large number of exogenous input variables requires extensive knowledge of all relevant influences. The same team has already proposed a feature extraction algorithm using neural networks to achieve the same goal (Luo et al. 2020). They also use a detailed set of variables for weather description plus information on the calendar, including holidays.  $R^2$  values larger than 92% are reported. Again, the applicability of the algorithm critically depends on the availability of detailed data.

A different approach has been chosen in Luo et al. (2020): A thermodynamic reduced order model is derived to analytically describe the individual building zones. Equivalent-circuit models for each building zone are coupled to result in a linear 82-states states space model. An extended Kalman filter is employed to obtain the estimates. The authors concede that accurate knowledge of the model parameters and input variables is crucial for successful implementation. In Andersen et al. (2021), a tool for generating aggregated load forecasts only based on floor area and outdoor temperature is presented. A simple energy efficiency categorization is performed prior to the prediction. In winter time, the heating load could be predicted quite well, while consumption in summer time was not predicted accurately.

A simple method for load prediction is reported in Lemence & Tamayao (2021). For the purpose of power supply for healthcare units in rural areas, the electrical power consumers and converters of the specific premises were recorded. Based on that data and using historic measured consumptions a grid-connected and an off-grid scenario was considered. Using an existing simulation platform for buildings the load profiles for different scenarios were obtained. Obviously, this method requires high effort in gathering all the information necessary for setting up the central simulation. A good overview on load modeling technologies is given in Lindberg et al. (2019) and Ramokone et al. (2021). The authors propose an energy signature curve for each considered non-residential building, and the final model considers the complete calendar, the ambient temperature, and other explanatory variables. It is interesting that this model is intended for long term (e.g. 10-30 years ahead) studies. Accordingly, the accuracy over a 24-hour time span is limited.

Another paper dealing with the load prediction of non-residential buildings utilizes simple statistics Coughlin, et al. (2009). Although in this way a basis for clustering or data preprocessing is provided, it cannot be directly used for dynamic predictions. It is rather used for predicting the probability of e.g., load sheds to support planning and analysis of grid operators. A different approach is reported in Pedersen, et al. (2008). The authors use piecewise linear regressions for heat load models and probability distribution analyses for the electrical load profile. The background knowledge of generalized electricity load profiles is used to obtain a more robust result. The load prediction method presented can be used for the purpose of planning for mixed energy distribution systems. In Chuan & Ukil (2015), it is shown that residential buildings need to be modeled differently to non-residential buildings as the electrical load profiles differ considerably. Gathering extensive data of all household appliances a model is set up and validated, although no decisive Figures are given to evaluate the model quality.

In the remainder of this paper, we outline the approach to use linear dynamic models for adaptive prediction of load profiles. This feature can be combined with internal multiple model (IMM) observers for fast-tracking of current load profiles. Another application is to utilize the load predictions in a Takagi-Sugeno Fuzzy controller for adaptive-predictive energy management.

## 2 DATA-BASED MODEL EXTRACTION

This paper identifies the corresponding utilization profiles from historical data by using clustering methods like K-means, which is an unsupervised machine-learning algorithm. Additionally, the singular value decomposition (SVD) is used to reduce the dimension of the data prior to the learning process of the k-means Clustering. As shown in Fig. 1, the raw data is reduced offline into a finite number  $N$  of load profiles. The load profiles represent the significant features in a static model description.

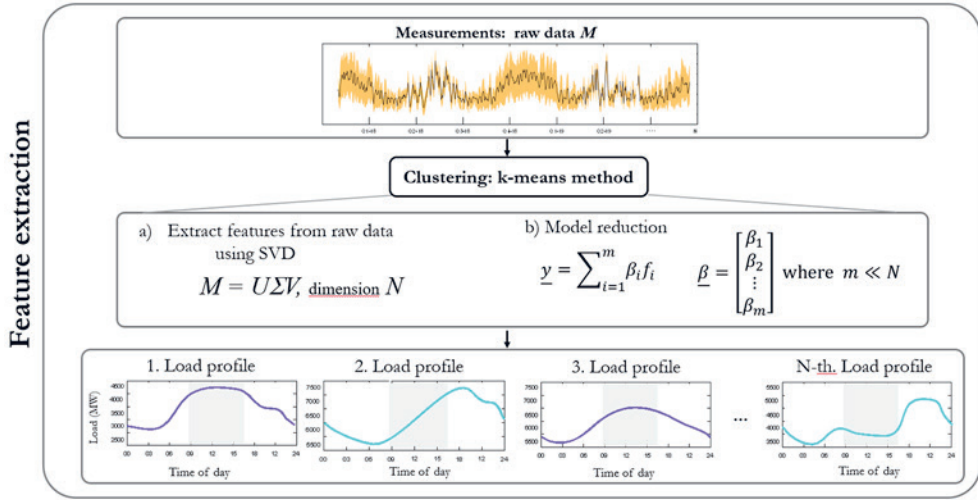


Fig. 1: Extraction of features (load profiles) from historic data using k-means clustering method with dimensional reduction

Based on the offline models and the clustered data, the online learning of the dynamic models is implemented. In online operations, these models are used to

1. Quickly determine which of the identified profiles is present.
2. Provide predictions for the future trend based on the identified models.
3. Superimpose valid models weighted by internal model models

For the online model learning progress, we apply the concepts of dynamic mode decomposition with control (DMDc) (see Narasingam & Kwon 2017; Proctor et al. 2016) to capture the local dynamics associated with the clustered load profiles and develop multiple models that describe the fully-resolved data. Fig. 2 illustrates the learning process where the clustered data is first collected and organized in corresponding snapshot matrices.

Following an approximation of the dynamic system matrices and resulting in a model, representing the dynamic properties of the used clustered data. Each cluster has to go through this learning process resulting in  $N$  linear dynamic models, which also can be updated online.

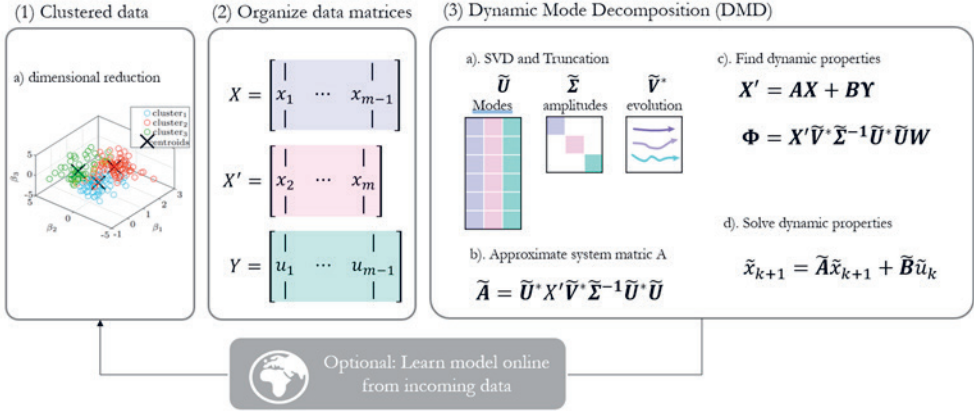


Fig. 2: Linear dynamic model identification based on clustered data

### 3 PREDICTION AND CONTROL

As shown in the previous section, we apply the DMDc and combine the learning model concept with the interacting multiple model approach (IMM), as shown in Fig. 3 (left). The IMM is utilized to improve the accuracy of the predictions. The IMM algorithm, proposed by Blom and Bar-Shalom (Kirubarajan & Bar-Shalom 2003; Blom & Bar-Shalom 1988), switches among the set of designed models. The final prediction is obtained by controlling a Markov chain and the estimations of a weighted sum of Kalman filters. Each Kalman Filter is designed by a model learned by the method described in this paper.

The presented concept is the basis for efficient modern optimization frameworks like the model predictive controller (MPC) (Killian & Kozek 2019) and delivers valuable information, especially for storage management systems, see Fig. 3 (right). In addition, the method can also be used for different energy sources regardless of pure electrical or thermal consumption. Also, mixed and coupled (thermal-energetic) building models can be mapped and optimized.

The proposed method is highly flexible, with no limitations on the number of usage patterns, building size, house type, or building location.

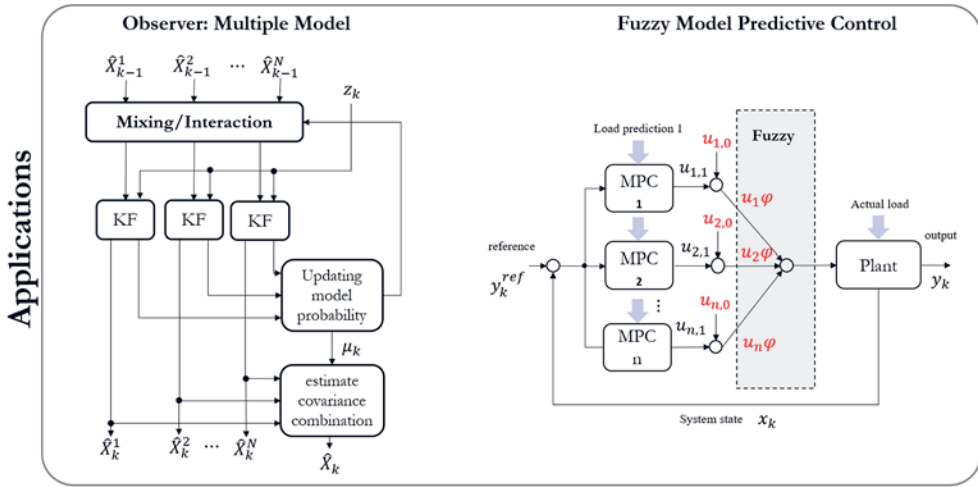


Fig. 3: Applications for dynamic mode decomposition in buildings. Left: Interacting multiple models (IMM) for prediction of future loads. Right: Fuzzy model predictive control for building energy management utilizing predictions from IMM

## 4 BUILDING APPLICATION ISSUES

Crucial for the implementation of this method is the availability of measurements. For the presented control application, a dynamic building model must be set up in addition. As shown in Killian & Kozek (2016), setting up building models can be challenging and needs expert knowledge and also more data.

A general challenge of data-based methods is ensuring that the data is representative and free of systematic errors or bias.

The computation of Singular Value Decompositions (SVDs) is also crucial for a successful application. The computation of the SVD can be intensive and may require significant processing power. However, using cloud computing, SVDs can be performed efficiently and effectively.

In summary, to use the presented method efficiently, it is necessary to set up a dynamic building model, compute SVDs, and ensure that the data used is representative and free from systematic errors. While these steps can be time-consuming and require specialized knowledge, they are essential for achieving accurate and effective control.

## 5 CONCLUSION

Overall, this method is an essential extension of monitoring and controlling through prediction. The proposed data-driven approach offers offline self-learning and online adaptation, which provides a flexible building management framework. An extension of this method to production facilities is straightforward.

Load profiles of modern buildings become increasingly more complex and difficult to categorize. The proposed solution offers a methodology to automatically identify the specific load profiles of a building even when mixed residential/commercial usage exists. The method can easily be extended to online adaptation, thus tracking the changing usage of a building over time.

For some years to come the limited computational resources of a building automation system will not allow the straightforward implementation of the method. Nevertheless, using cloud computing, the proposed method could even be offered as a commercial service.

## LITERATURE

- Andersen K. H., Lien S. K., Walnum H. T., Lindberg K. B., & Sartori I. (2021) Further development and validation of the “PROFet” energy demand load profiles estimator. *Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA*.
- Blom H. A. P. & Bar-Shalom Y. (1988). The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE transactions on Automatic Control*, Band 33, p. 780–783.
- Böhler L., Krail J., Görtler G. & Kozek M. (2020) Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*, Elsevier.
- Chuan L. & Ukil A., (2015) Modeling and Validation of Electrical Load Profiling in Residential Buildings in Singapore. *IEEE Transactions on Power Systems*, Band 30, pp. 2800-2809.
- Coughlin K., Piette M. A., Goldman C. & Kiliccote S., (2009) Statistical analysis of baseline load models for non-residential buildings. *Energy and Buildings*, Band 41, p. 374–381.
- Killian M. & Kozek M. (2019) Short-term occupancy prediction and occupancy based constraints for MPC of smart homes. *IFAC-PapersOnLine*, Band 52, p. 377–382.
- Killian M. & Kozek M. (2016) Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings, *Building and Environment*, Volume 105, 2016, Pages 403-412,
- Kirubarajan T. & Bar-Shalom Y., (2003) Kalman filter versus IMM estimator: when do we need the latter?. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Band 39, p. 1452–1457.
- Lemence A. L. G. & Tamayao M.-A. M. (2021) Energy consumption profile estimation and benefits of hybrid solar energy system adoption for rural health units in the Philippines. *Renewable Energy*, Band 178, p. 651–668.
- Lindberg K. B., Bakker S. J. & Sartori I. (2019) Modelling electric and heat load profiles of non-residential buildings for use in long-term aggregate load forecasts. *Utilities Policy*, Band 58, p. 63–88.
- Luo X. & Oyedele, L.O. & Ajayi A.O. & Akinadé, O & Owolabi H. & Ashraf A. (2020). Feature extraction and genetic algorithm enhanced adaptive deep neural network for energy consumption prediction in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 131. p. 109980. DOI:10.1016/j.rser.2020.109980.
- Luo X. & Oyedele L.O., (2022) A self-adaptive deep learning model for building electricity load prediction with moving horizon. *Machine Learning with Applications*, Band 7, p. 100257.
- Narasimam A. & Kwon J. S.-I. (2017) Development of local dynamic mode decomposition with control: Application to model predictive control of hydraulic fracturing. *Computers & Chemical Engineering*, Band 106, p. 501–511.
- O’Neill Z., Narayanan S. & Brahme R. (2010) Model-based thermal load estimation in buildings. *Proceedings of simbuild*, Band 4, p. 474–481.
- Pedersen L., Stang J. & Ulseth R. (2008) Load prediction method for heat and electricity demand in buildings for the purpose of planning for mixed energy distribution systems. *Energy and Buildings*, Band 40, p. 1124–1134.
- Proctor J. L., Brunton S. L. & Kutz J. N. (2016) Dynamic mode decomposition with control. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, Band 15, p. 142–161.
- Ramokone A., Popoola O., Awelewa A. & Temitope A. (2021) A review on behavioural propensity for building load and energy profile development–Model inadequacy and improved approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Band 45, p. 101235.

### Kontaktdaten:

Agnes Poks

TU Wien

Getreidemarkt 9/E325

1060 Wien, Austria

Email: agnes.poks@tuwien.ac.at

# Fault Detection applied on a real building

A. Kühner<sup>1)</sup>, F. Hengel<sup>2)</sup>, M. Gumhalter<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

<sup>2)</sup> *AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich*

**ABSTRACT:** This paper provides an introductory overview of the methodologies in the field of fault detection and fault diagnosis. The sub-area of data-based methods and in particular the field of machine learning were considered in depth and a method for fault detection in a real building was selected and subsequently applied. The chosen method was the Support Vector Machine, which originates from the field of supervised machine learning. The detection of a window opening in a room of a real office building served as a use case for the fault detection. The measurement data, which covers a period of two months, contains a total of seven different parameters of the room and was used both for the creation of the ML algorithm (training and testing) and for the detection of the intentionally implemented error (window opening) by the SVM. The ML algorithm for classification was optimized after creation and at the beginning the unmodified dataset without an active window opening was classified by the algorithm. In the next step, the modified dataset with an active window opening was classified. It was shown that a window opening in the room was detected 100 % of the time by the Support Vector Machine, which means that the data was classified correctly. These systems can therefore also be used for more complex building systems and offer possibilities, for example in the field of facility management, ranging from the timely or immediate detection of component failures to a complete FDD-based maintenance strategy.

## 1 FDD-SYSTEME IM ÜBERBLICK

### 1.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Fault Detection and Diagnosis oder kurz FDD wird nach Katipamula & Brambley (2005, S. 3) als Forschungsgebiet definiert, welches sich generell mit den automatisierten Fehlererkennungs- und Ursachendiagnoseprozessen befasst. Eine Definition des Begriffes FDD mit Bezug auf die Gebäudetechnik bzw. auf HVAC-Systeme liefern Capehart & Brambley (2020, S. 86), welche FDD als Prozess definieren, bei dem die Daten von gebäudetechnischen Systemen bzw. Anlagen unter Zuhilfenahme von Analysemethoden untersucht werden, um somit die verborgenen Fehler zu erkennen und zu diagnostizieren. Willsky (1976, S. 601) beschrieb, dass für die steigende Nachfrage an Systemdesigntechniken zur Optimierung von Prozessen und Systemen, hinsichtlich der benötigten digitalen Hard- und Software, die zunehmende Verfügbarkeit und die sinkenden Preise maßgeblichen Anteil hatten. Ein Bereich bzw. eine Disziplin, die eine solch gesteigerte Nachfrage zeigte, war die Luftfahrt. Speziell der Bereich der digitalen Steuerung von Flugzeugen, aber auch in der Medizintechnik, beispielsweise im Bereich der Elektrokardiografie wurde der Ruf nach Methoden zur Erkennung und Diagnose von Abweichungen bzw. Fehlerzuständen immer lauter. Isermann (1984, S. 387) stellte fest, dass auf Basis der immer weiter zunehmenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Sicherheit von technischen Anlagen und den darin enthaltenen Komponenten, Methoden zur Verbesserung der Überwachung sowie der ganzheitlichen Systemüberwachung immer weiter in den Fokus rückten. Als Notwendigkeit für die Weiterentwicklung automatisierter Überwachungen von Anlagen und Prozessen gilt die frühzeitige Detektion von Fehlern. Weiters führte Isermann (1984, S. 387) aus, dass die bisher zur Anwendung gekommenen Methoden für eine solche Fehlererkennung darauf aufbauten, dass ein Fehler erst erkannt wurde, wenn ein gesetzter Grenzwert über- oder unterschritten wurde. Durch gezieltere und bessere Nutzung von Daten sollten mit den künftigen Unternehmungen Fehler frühzeitig erkannt und gezielter lokalisiert werden können. Katipamula & Brambley (2005, S. 3-6) zeigten auf, dass FDD und die zugehörigen Forschungen vor allem im Bereich der Industrie ihre Anfänge nahmen. Ähnlich wie Willsky (1976, S. 601) definierten Katipamula & Brambley (2005, S. 3-6)

die Anfänge von FDD im Bereich der Luftfahrt als auch der Raumfahrt. Darüber hinaus wurden solche Ansätze auch noch in den Bereichen der Atomindustrie, der Prozessindustrie und ebenso im Bereich der nationalen Verteidigung eingesetzt. Aus heutiger Sicht, weist FDD in diesen Bereichen eine bereits seit Jahrzehnten andauernde Forschung und Entwicklung auf und ist keinesfalls eine Erscheinung der Neuzeit. Eine kürzere Geschichte weisen FDD-Methoden bzw. FDD-Systeme im Bereich der Gebäudetechnik (HVAC&R-Systeme) auf. Nach Shi & O'Brien (2019, S. 215) und Katipamula & Brambley (2005, S. 6) wurden die ersten Versuche zur Erstellung von automatischen Fehlererkennungs- und Diagnosesystemen im Bereich der Gebäudetechnik bzw. im Bereich von gebäudetechnischen Komponenten in den 1980-er und 1990-er Jahren unternommen. Shoureshi & McLaughlin (1985, S. 155) beschrieben, dass aufgrund der zu ihrer Zeit jüngst vergangenen Energiekrise, die Dynamik und Steuerung von Thermofluidprozessen in den Vordergrund gerückt sei. Als Beispiel für Systeme, welche in allen gesellschaftlichen Bereichen genutzt werden, wurden die bereits zuvor genannten gebäudetechnischen Systeme angeführt. Das gesteigerte Interesse in dem Themenbereich der Fault Detection and Diagnosis zeigte sich nach Isermann & Ballé (1997, S. 709) auch bei der International Federation of Automatic Control (IFAC), als diese im Jahre 1991 ein eigenes Komitee (SAFEPROCESS Steering Committee) dafür ins Leben rief. Neben der Fokussierung auf die Dynamik und die Steuerung von Prozessen beschrieben Venkatasubramanian et al. (2003, S. 294), dass zu ihrer Zeit bereits enorme Fortschritte und Erfolge im Bereich der computergestützten Steuerung von komplexen Prozessen erzielt wurden. So wurden einfachere Steuerungsaufgaben, welche vorher per Hand durchgeführt wurden vollständig von Computern bzw. Programmen übernommen. Trotz der Mehrwerte für die Industrie, welche die Entwicklungen in den Bereichen der dezentralen Steuerungen oder auch der modellbasierten prädiktiven Steuerungssysteme mit sich brachten, lagen wichtige Aufgaben und Tätigkeiten im Bereich der Reaktion auf abnormale Betriebszustände im Bereich der Menschen. Aus den Tätigkeiten, welche die zeitliche Erfassung, die Diagnose des Ursprungs als auch die Setzung von Maßnahmen zur Wiederherstellung des Betriebszustandes umfassen, leitete sich der Begriff des Abnormal Event Management (AEM) ab. Die gestiegene Komplexität von Anlagen und den zugehörigen Prozessen, bewirkte auch eine Steigerung der Komplexität für den Menschen hinsichtlich Bedienung und Überwachung. Hinzu kamen noch Faktoren wie ungenaue oder unvollständige Messungen, welche auf der einen Seite auf Fehler schließen ließen und auf der anderen Seite weitere Fehler durch eventuell falsch gesetzte Maßnahmen von Seiten des Betriebspersonals hervorbrachten. (Venkatasubramanian et al. 2003, S. 294)

Eben dieser Komplexität ist es geschuldet, dass die Menschen, die an solchen Anlagen oder Systemen arbeiten, dazu neigen, Fehler zu machen, oder falsche Entscheidungen auf Basis von falschen oder unvollständigen Daten treffen, welche im schlimmsten Fall die Situation noch verschärfen und größere Schäden provozieren. Besonders im Bereich der Industrie lag der prozentuelle Anteil an vom Menschen verursachten Fehlern nach Venkatasubramanian et al. (2003, S. 294) bei einem Wert von rund 70 %. Des Weiteren beschrieben Venkatasubramanian et al. (2003, S. 294), dass die Automatisierung des AEM-Prozesses, besonders im Bereich der Prozessindustrie von hoher Bedeutung für die Unterstützung des Betriebspersonals war. Industrielle Prozesse bzw. industrielle Anlagen weisen im Vergleich zu den meisten gebäudetechnischen Anlagen eine doch größere Systemausdehnung sowie die damit einhergehende und schon zuvor erwähnte Komplexität auf. Nichtsdestotrotz bilden auch gebäudetechnische Anlagen komplexe Systeme ab und bestehen nach Mirnaghi & Haghighat (2020, S. 2) aus Teilsystemen, welche die Komplexität einer Steuerung und Regelung deutlich erhöhen. Für die automatische Detektion und die Diagnose von Fehlern in solch komplexen Anlagen bzw. Systemen werden in logischer Konsequenz auch die von Capehart & Brambley (2020, S. 86) beschriebenen komplexen Algorithmen benötigt, um diese zu erkennen. Weiters können diese Algorithmen oder automatischen FDD-Systeme nach Mirnaghi & Haghighat (2020, S. 2) einfach auf HVAC-Systeme angewendet bzw. in diese implementiert werden. Mit der Implementierung dieser FDD-Systeme ergeben sich vor allem im Bereich des Facilitymanagements, die von Capehart & Brambley (2020, S. 86-87) beschriebenen Vorteile:

- Reduktion von Wartungskosten und Kostenreduktion durch geringeren Energieverbrauch
- Produktivitäts- und Lebensdauersteigerung der Anlagen bzw. Systeme

### 1.2 METHODEN UND DEREN KLASSIFIZIERUNGSPROBLEMATIK

Der Bereich der Fault Detection and Diagnosis weist bereits eine sehr lange Entwicklungszeit in Branchen wie der Industrie, der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik auf. Aufgrund dessen finden sich bei Betrachtung der Methoden und deren Klassifizierungen auch immer wieder Unterschiede hinsichtlich der Zuordnungen, der angeführten Methoden und der Tiefe bzw. der Genauigkeit bei der Kategorisierung. Aufgrund des breiten Spektrums an Anwendungsgebieten und der damit einhergehenden Vielzahl an Anwendungsfällen finden sich in der Literatur diverse Klassifizierungen, welche sich jedoch nur bis zu einer gewissen Klassifizierungsebene decken. Auf Grundlage der verfügbaren und betrachteten Literatur zeigt sich, dass sich für die Klassifizierung der Ansatz mit einer Einteilung in modell- und datenbasierte Methoden und deren Unterkategorien nach Zhang & Jiang (2008, S. 237), Venkatasubramanian et al. (2003, S. 301) sowie Katipamula & Brambley (2005, S. 9) durchgesetzt bzw. behauptet hat. Die Abb. 1 zeigt die Einteilung in modell- und datenbasierte Methoden und deren Unterkategorien.

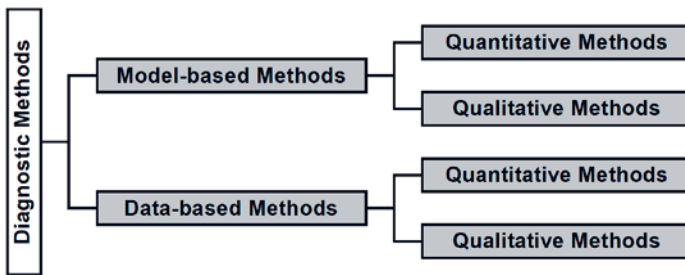


Abb. 1: Einteilung der FDD-Methoden in modell- und datenbasierte Methoden und deren beiden Unterkategorien nach Zhang & Jiang (2008, S. 237), Venkatasubramanian et al. (2003, S. 301), Katipamula & Brambley (2005, S. 9)

### 1.3 METHODEN IM BEREICH DES MACHINE LEARNINGS

Die Fokussierung bei Machine Learning liegt auf dem selbstständigen Lernen des Algorithmus aus den Daten. Gegenüber der klassischen Programmentwicklung lernt der Algorithmus aus den Daten und erstellt seinen Code selbst. Je nach dem welcher Algorithmus im Bereich des Machine Learnings zur Anwendung kommt wird zwischen folgenden von Wuttke (2022, S. 1) beschriebenen und in Abb. 2 dargestellten Arten unterschieden.

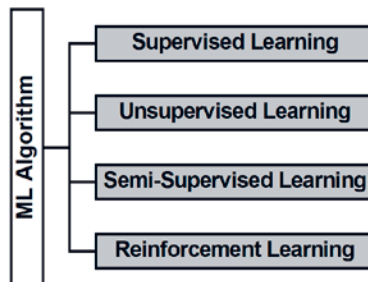


Abb. 2: Visualisierung der grundsätzlich zu unterscheidenden Algorithmen des Machine Learnings nach Wuttke (2022, S. 1)

## 2 FDD-METHODE

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Methodiken, die für die Fehlererkennung und Fehlerdiagnose im Bereich von gebäudetechnischen Systemen in Frage kommen. Dabei hängt die Eignung der Methodiken stark von den Anlagen, den vorhandenen Daten, den Nutzerpräferenzen und den Eigenschaften und Eignungen der Methodiken an sich ab. Auf Grundlage der getroffenen Recherchen wurde als Methode des maschinellen Lernens (Machine Learning) die Support Vector Machine für einer genauere Betrachtung und in weiterer Folge für die Modellerstellung ausgewählt.

### 2.1 SUPPORT VECTOR MACHINE SVM

Eine Support Vector Machine deckt nach Pedregosa et al. (2011, S. 2825-2830) die Aufgabengebiete der Datenklassifizierung, der Regression sowie der Ausreißerdetektion ab. Nach Luber (2019, S. 1) handelt es sich bei der Support Vector Machine um eine mathematische Methode und einen statistischen Ansatz welcher nach Ray (2021, S. 1) hauptsächlich im Bereich der Klassifizierung Anwendung findet. Aufgrund dessen, dass es sich bei der Support Vector Machine um eine Methode des überwachten Lernens handelt, benötigt die SVM einen Datensatz mit Trainingsdaten, welcher bereits eine Klassifizierung aufweist, um den SVM-Algorithmus zu erstellen, zu trainieren und zu testen. Die klassifizierten Daten des Trainingsdatensatzes werden in einem n-dimensionalen Raum dargestellt. Die Support Vector Machine bzw. deren Algorithmus implementiert im nächsten Schritt eine Trennebene, welche immer eine Dimension unterhalb des Raumes liegt, so zwischen die Datenpunkte, um den Abstand zwischen der Trennebene und den ihr am nächsten liegenden Datenpunkten (= Stützvektoren) zu maximieren. Die Abb. 3 zeigt die Visualisierung von Daten und der Trennebenen im 2-dimensionalen Raum.

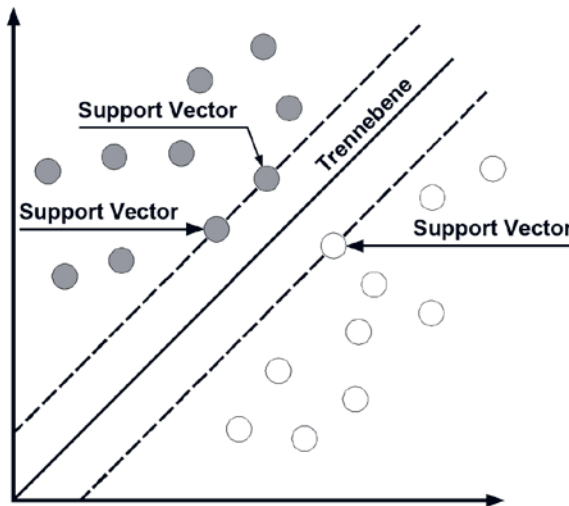


Abb. 3: Visualisierung von Daten und Trennebenen im 2-dimensionalen Raum nach MathWorks (2022a, S. 1) und Doreth (2022, S. 1)

### 2.2 SVM-MODELLERSTELLUNG

Die Erstellung der Support Vector Machine wurde mittels der Programmiersprache Python durchgeführt. Für die Grundlegende Datenbe- und Datenverarbeitung wurden die in der Tab. 1 verzeichneten Pakete bzw. Bibliotheken verwendet.

Tab. 1: Übersicht über die grundlegenden Pakete/Bibliotheken für die Modellerstellung

Paket / Bibliothek	Grundlegende Funktion	Verweis
Pandas	Open-Source-Werkzeug für die Bearbeitung sowie Manipulation von Daten	(The pandas development team 2020, S. 1)
Numpy	Dient als Grundlage für wissenschaftliche Berechnungen in Python	(Harris et al. 2020, S. 357-362)
Matplotlib	Dient der Erstellung von statischen, animierten und interaktiven Visualisierungen in Python	(Hunter 2007, S. 90-95)
Scikit-learn	Open-Source-Bibliothek für Machine Learning (überwacht und nicht überwacht) sowie für Modellauswahl, Datenvorverarbeitung, Modellbewertung etc...	(Pedregosa et al. 2011, S. 2825-2830)
openpyxl	Dient zum Öffnen und Schreiben von Excel 2010 Dateien	(Gazoni & Clark 2022, S. 1)

Die für die Erstellung des ML-Algorithmus herangezogenen Module aus dem Python-Paket „Scikit-learn“ sind in der Tab. 2 verzeichnet.

Tab. 2: Module für die Erstellung des ML-Algorithmus

Modul	Befehl in Python	Anwendung
Train_Test_Split	sklearn.model_selection.train_test_split	Aufteilung der Daten in Trainings- und Testdaten
Scaling	sklearn.preprocessing	Skalierung der Daten für die Verarbeitung durch den Algorithmus
Support Vector Classifier	sklearn.svm.SVC	Erstellung des Klassifizierers der Support Vector Machine
Optimization	sklearn.model_selection.GridSearchCV	Optimierung des Klassifizierers
One-Hot-Encoding	pandas.get_dummies	Verarbeitung kategorialer Daten
Confusion-Matrix	sklearn.metrics.ConfusionMatrixDisplay.from_estimator	Bewertung der Klassifizierung

### 3 RAUMMODELL

Die Anwendung der Support Vector Machine erfolgt für den Anwendungsfall der Detektion einer Fensteröffnung in einem Raum eines Bürogebäudes. Der gewählte Raum besitzt, die in Tab. 3 verzeichneten Eckdaten und eine schematische Darstellung, welche die für die Fehlererkennung und Fehlerdetektion herangezogenen Sensoren visualisiert (Abb. 4).

Tab. 3: Eckdaten des gewählten Bürogebäudes bzw. des gewählten Raumes

Gebäude- und Rauminformationen	
Land	Österreich
Bundesland	Kärnten
Geschoß	3. OG
Fläche	72,92 m <sup>2</sup>
Arbeitsplätze	12

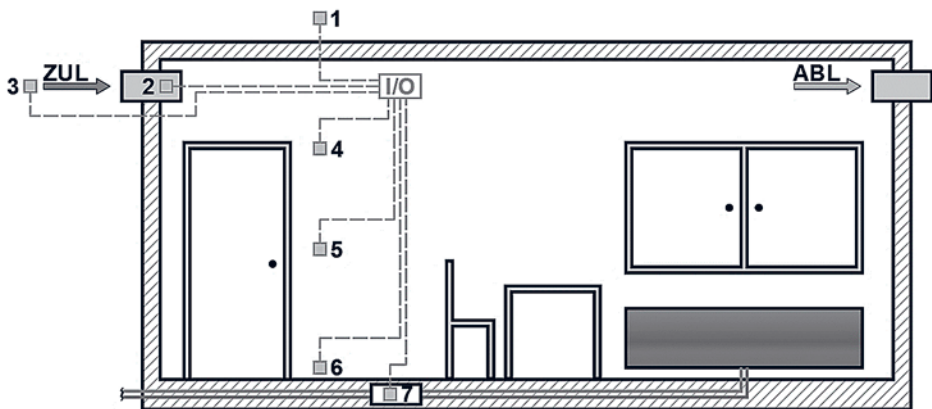


Abb. 4: Schematische Darstellung des Raumes inkl. der zugehörigen Sensoren

### 3.1 MESSDATEN, SENSOREN UND PARAMETER

Bestimmte Messdaten bzw. Parameter sind schwer bzw. nicht beeinfluss- oder veränderbar, weshalb eine Einbeziehung in die Klassifizierung für den Trainingsprozess der Support Vector Machine nicht sinnvoll bzw. nicht notwendig ist. In Tab. 4 sind die einzelnen (verwendeten) Sensoren sowie die zugehörigen Parameter für die Fehlererkennung verzeichnet. Des Weiteren ist die Festlegung einer Klassifizierung (ja/nein) hinsichtlich eines zulässigen oder nicht zulässigen Zustandes mit Hinblick auf den daraus resultierenden Raumzustand darin ersichtlich.

Tab. 4: Verwendete Sensoren und Parameter für die Fehlererkennung und Fehlerdiagnose des zweiten Use-Cases (Raummodell)

Nr.	Parameter	Einheit	Klass.
1	Außenlufttemperatur	°C	nein
	Relative Feuchte der Außenluft	%	nein
2	Zulufttemperatur	°C	ja
	Relative Feuchte der Zuluft	%	nein
	CO <sub>2</sub> -Konzentration der Zuluft	ppm	nein
3	Zuluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h	nein
4	Relative Feuchte im Raum	%	ja
	CO <sub>2</sub> -Konzentration im Raum	ppm	ja
5	Raumtemperatur in 110 cm Höhe über dem Fußboden	°C	ja
6	Raumtemperatur in 10 cm Höhe über dem Fußboden	°C	ja
7	Aktuelle Leistung des Wärmemengenzählers	kW	ja

### 3.2 MUSTERKLASSIFIZIERUNG FÜR SVM-TRAININGSPROZESS

Da es sich bei der SVM um eine überwachte Lernmethode handelt, sind für den Trainingsprozess klassifizierte Daten notwendig.

Diese wurde selbsttätig hinzugefügt und die Bedingungen der einzelnen Parameter sind in Tab. 5 verzeichnet.

Tab. 5: Parameter, Klassen und Klassifizierungsgrenzen

Parameter	Klassenbezeichnung	Bedingung
Zulufttemperatur	Zulässige	$20,0\text{ °C} < T_{\text{ZUL}} < 23,0\text{ °C}$
	Nicht zulässige	$20,0\text{ °C} > T_{\text{ZUL}} > 23,0\text{ °C}$
Relative Raumluftfeuchte	Zulässige	$8,0\% < r.H_{\text{Room}} < 40,0\%$
	Nicht zulässige	$8,0\% > r.H_{\text{Room}} > 40,0\%$
CO <sub>2</sub> -Konzentration im Raum	Zulässige	$350\text{ ppm} < \text{CO}_{2\text{-Room}} < 1000\text{ ppm}$
	Nicht zulässige	$350\text{ ppm} > \text{CO}_{2\text{-Room}} > 1000\text{ ppm}$
Raumtemperatur in 110 cm Höhe über dem Fußboden	Zulässige	$19,0\text{ °C} < T_{\text{ZUL}} < 25,5\text{ °C}$
	Nicht zulässige	$19,0\text{ °C} > T_{\text{ZUL}} > 25,5\text{ °C}$
Raumtemperatur in 10 cm Höhe über dem Fußboden	Zulässige	$T_{\text{Room10}} \geq T_{\text{Room10\_min}}$
	Nicht zulässige	$T_{\text{Room10}} \leq T_{\text{Room10\_min}}$
Aktuelle Leistung des Wärmemengenzählers	Zulässige	$P_{\text{WMZ}} \leq 1,90\text{ kW}$
	Nicht zulässige	$P_{\text{WMZ}} > 1,90\text{ kW}$

Die Berechnung der Temperatur  $T_{\text{Room10\_min}}$  erfolgt mit der Gleichung (1).

$$T_{Room10\_min} = T_{Room110} - [T_{Room110} - x \cdot (T_{Room110} - T_{Room10})] \quad (1)$$

$T_{Room10\_min}$	Minimale Temperatur in 10 cm Höhe über dem Fußboden in °C
$T_{Room110}$	Temperatur in 110 cm Höhe über dem Fußboden in °C
$T_{Room10}$	Temperatur in 10 cm Höhe über dem Fußboden in °C
$x$	Variable für den Abzug der mittleren Differenz (gewählt $x = 3$ )

## 4 ERGEBNISSE

Für die Detektion der Fensteröffnung wurde ein Datensatz herangezogen, welcher die Messwerte des Raumes für die Monate Februar und März des Jahres 2022 im Intervall von einer Minute enthält ausgewählt. Somit ergeben sich insgesamt 84960 Datenreihen (Zeilen) mit Messwerten des Raumes. Nach der Erstellung der Support Vector Machine (inkl. Training, Test und Optimierung) wurde diese im nächsten Schritt mit neuen Daten zur Klassifizierung konfrontiert.

Die für den Erstellungsprozess herangezogenen Parameterwerte der einzelnen Python-Module, sowie sonstige Einstellungen und Werte sind in der Tab. 6 verzeichnet. Für die nicht angeführten Parameter wurden die Standardwerte verwendet.

Tab. 6: Parameterwerte der einzelnen Python-Module für den SVM- Erstellungsprozesses

Modul	Werte und Einstellungen
Train_Test_Split	test_size = 0.2 random_state = 42
Scaling	MinMaxScaler
SV-Classifer before Optimization	random_state = 42
Optimization	C: [0.1,0.5,1,10,100] gamma: [„scale“,1,0.1,0.01,0.001,0.0001] kernel: [„rbf“]
SV-Classifer after Optimization	C = 100, gamma = ‘scale’, kernel = ‘rbf’ random_state= 42
Confusion-Matrix	clf_svm, X_test_scaled, y_test, values_format=‘d’, display_labels = [„not allowed“, „allowed“]

### 4.1 SIMULATION FENSTERÖFFNUNG

Bei den neuen Daten für den Test des Klassifizierers der erstellten Support Vector Machine wurde der für die Erstellung (Training und Test) verwendete Datensatz herangezogen. Dabei wurden folgende Tests durchgeführt:

- Test mit dem vollständigen und nicht modifizierten Datensatz
- Test mit dem vollständigen und modifizierten Datensatz (Modifikation von 50 Datenreihen zur Simulation der Fensteröffnung)

Zur Simulation der Fensteröffnung wurde bei dem modifizierten Datensatz (Bereich Februar) eine Parameterveränderung um den Faktor  $f = 1,5$  bei den folgenden Parametern durchgeführt:

- Raumtemperatur in 110 cm Höhe: Verringerung des Wertes um Faktor  $f$
- Raumtemperatur in 10 cm Höhe: Verringerung des Wertes um Faktor  $f$
- Leistung des Wärmemengenzählers: Erhöhung des Wertes um Faktor  $f$

#### 4.2 TEST DES ERSTELLTEN UND OPTIMIERTEN KLASSIFIZIERERS

Zum Vergleich der Klassifizierungsergebnisse für den modifizierten als auch den nicht modifizierten Datensatz wurde eine Konfusionsmatrix (Confusion-Matrix) herangezogen. Die Matrix stellt die tatsächliche Klassifizierung (Manuelle Klassifizierung aus Trainingsprozess) und die vorausgesagte Klassifizierung (SVM) gegenüber. Des Weiteren liefert die Matrix genaue Angaben zu den einzelnen Klassen und deren Klassifizierungen hinsichtlich der korrekten oder nicht korrekten Klassifizierung. Als erstes wurde der nicht modifizierte Datensatz durch den Klassifizierer der Support Vector Machine klassifiziert. Anschließend wurde der modifizierte Datensatz durch den Klassifizierer der Support Vector Machine klassifiziert. Die Ergebnisse sind in der Abb. 5 ersichtlich. Die linke Matrix zeigt das Ergebnis für den nicht modifizierten Datensatz und die rechte Matrix für den modifizierten Datensatz mit Fensteröffnung.

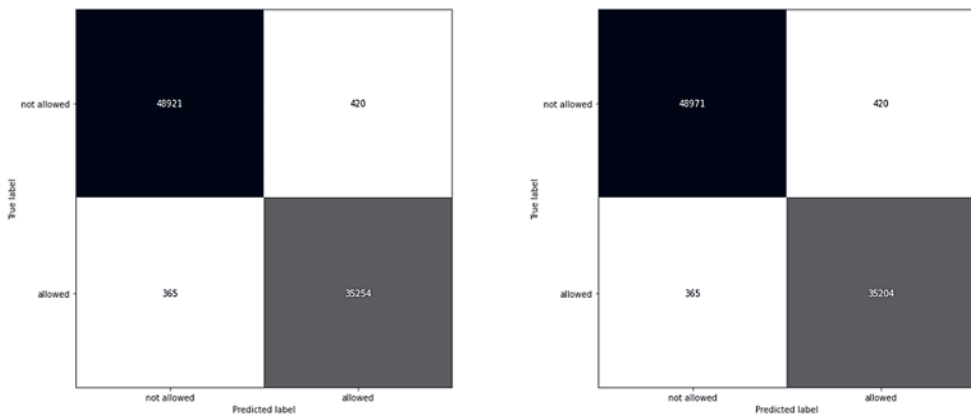


Abb. 5: Konfusionsmatrizen für den nicht modifizierten Datensatz (links) und den hinsichtlich einer Fensteröffnung modifizierten Datensatz (rechts)

Bei dem Datensatz ohne Fensteröffnung wurden 35254 zulässige Zustände auch als solche von der SVM erkannt und des Weiteren wurden 48921 nicht zulässige Zustände als solche erkannt. 365 zulässige Zustände wurden als nicht zulässig und 420 nicht zulässige Zustände wurden als zulässig von der SVM missklassifiziert. Die 50 modifizierten Datenreihen (Zeilen) wurden durch die Support Vector Machine korrekt klassifiziert. So verringerte sich die Anzahl der tatsächlich zulässigen und als zulässig klassifizierten Datenreihen um 50 und die Anzahl der tatsächlich nicht zulässigen und als nicht zulässig klassifizierten Datenreihen erhöhte sich um 50.

## 5 SCHLUSSFOLGERUNG

Der Bereich der Fehlererkennung bietet eine breite Auswahl an Methodiken wobei speziell im datenbasierten Bereich die Machine Learning Methoden großes Potential mit sich bringen. Die betrachtete

Support Vector Machine zeigt in den angeführten Ergebnissen, dass diese dazu in der Lage ist, Fehler bzw. nicht zulässige Zustände wie eine Fensteröffnung auch in komplexeren Anwendungen aus dem Bereich der Gebäudetechnik zu detektieren. Denkt man diese Einsatzmöglichkeiten weiter, zum Beispiel für den Bereich des Facility-Managements (hauptsächlich im Bereich der Nutzungsphase) ergeben sich dadurch Möglichkeiten, welche von der zeitnahen bzw. unmittelbaren Erkennung von Komponentenausfällen bis hin zur kompletten auf FDD basierenden Instandhaltungsstrategie reichen. Hierfür sind die damit verbundenen Bereiche der Fehlerisolierung (Fault Isolation), der Fehleridentifikation (Fault Identification) und Fehlerdiagnose (Fault Diagnosis) näher zu betrachten und zusätzlich zu der Fehlererkennung zu implementieren. Es ist jedoch festzuhalten, dass die FDD-Systeme immer weiter verbessert werden und an Bedeutung gewinnen. Diese Systeme benötigen qualifiziertes Personal mit spezifischem Wissen über die technischen Anlagen sowie belastbare und aussagekräftige Daten. Die Menschen hinter den Systemen lernen schon seit jeher aus Fehlern. In Zukunft lernen auch die Maschinen aus den Fehlern.

## LITERATUR

- Capehart B. L. & Brambley M. R. (Eds.) (2020) *Automated Diagnostics and Analytics for Buildings. Section II - Current Technology, Tools, Products, Services, and Applications* (1. Auflage). Alsbjergvej 10, 9260 Gistrup, Dänemark: River Publishers Verlag.
- Doreth, K. (2022) *Die Support Vector Machine – Der Versuch einer einfachen Erklärung* – doreth:engineering, doreth:engineering. Zugriff am 06.09.2022 um 13:20 Uhr. Verfügbar unter: <https://www.dorethengineering.de/?p=619>
- Gazoni E. & Clark C. (2022) *openpyxl - A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files. Version 3.0.10*, OpenPyXL. Zugriff am 18.11.2022 um 11:00 Uhr. Verfügbar unter: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>
- Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D. et al. (2020) *Array programming with NumPy*. *Journal Nature* (Vol. 585), S. 357–362. Zugleich online im Internet, abgerufen am 14.07.2022 um 15:00 Uhr: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2>
- Hunter J. D. (2007) *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. *Journal Comput. Sci. Eng. (Computing in Science & Engineering)* (Vol. 9), S. 90-95. Zugleich online im Internet, abgerufen am 16.08.2022 um 10:24 Uhr: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4160265>
- Isermann R. (1984) *Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey*. *Journal Automatica* (Vol. 20), S. 387–404. Zugleich online im Internet, abgerufen am 16.04.2022 um 09:15 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0005109884900980?via%3Dihub>
- Isermann R. & Ballé P. (1997) *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes*. *Journal Control Engineering Practice* (Vol. 5), S. 709–719. Zugleich online im Internet, abgerufen am 20.05.2022 um 18:30 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066197000531>
- Katipamula S. & Brambley M. (2005) *Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I*. *Journal HVAC&R Research* (Vol. 11), S. 3-25. Zugleich online im Internet, abgerufen am 20.05.2022 um 19:45 Uhr: [https://www.researchgate.net/publication/239924984\\_Methods\\_for\\_Fault\\_Detection\\_Diagnostics\\_and\\_Prognostics\\_for\\_Building\\_Systems\\_-\\_A\\_Review\\_Part\\_I](https://www.researchgate.net/publication/239924984_Methods_for_Fault_Detection_Diagnostics_and_Prognostics_for_Building_Systems_-_A_Review_Part_I)
- Luber S. (2019) *Was ist eine Support Vector Machine?*, Vogel IT-Medien GmbH. Zugriff am 06.09.2022 um 15:45 Uhr. Verfügbar unter <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-eine-support-vector-machin-a-880134/>
- MathWorks (2022a) *Support Vector Machine (SVM)*, The MathWorks, Inc. Zugriff am 11.09.2022 um 14:30 Uhr. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/discovery/support-vector-machine.html>
- Mirnaghi M. S. & Haghighat F. (2020) *Fault detection and diagnosis of large-scale HVAC systems in buildings using data-driven methods: A comprehensive review*. *Journal Energy and Buildings* (Vol.

- 229), S. 1–14. Zugleich online im Internet, abgerufen am 31.03.2022 um 15:30 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877882031327X?via%3Dihub>
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M. & Duchesnay É. (2011) Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* (Vol. 12), S. 2825–2830. Zugleich online im Internet, abgerufen am 03.09.2022 um 13:30 Uhr: <https://jmlr.csail.mit.edu/papers/v12/pedregosa11a.html>
- Ray, S. (2021) Understanding Support Vector Machine (SVM) algorithm from examples (along with code), Analytics Vidhya Educon Private Limited, 207, B-Block (Chamber 1), Corporate House, 169, RNT Marg, Indore 452001. Zugriff am 06.09.2022 um 13:00 Uhr. Verfügbar unter: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/09/understaing-support-vector-machine-example-code/>
- Shi Z. & O'Brien W. (2019) Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. *Journal Automation in Construction* (Vol. 104), S. 215–229. Zugleich online im Internet, abgerufen am 17.05.2022 um 17:15 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580518312354>
- Shoureshi R. & McLaughlin K. (1985) Microprocessor-Based Failure Detection of Heat Pumps. *Journal IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 18), S. 155–160. Zugleich online im Internet, abgerufen am 17.05.2022 um 16:30 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017602775>
- The pandas development team (Zenodo, Hrsg.) (2020) pandas-dev/pandas: Pandas, Pandas. Zugriff am 19.09.2022 um 07:25 Uhr. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Kavuri S. N. & Yin K. (2003) A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods (Vol. 27), S. 293–311. Zugleich online im Internet, abgerufen am 21.04.2022 um 18:05 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135402001606>
- Willsky A. S. (1976) A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Journal Automatica* (Vol. 12), S. 601–611. Zugleich online im Internet, abgerufen am 12.04.2022 um 14:25 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0005109876900418?via%3Dihub>
- Wuttke L. (2022) Machine Learning: Definition, Algorithmen, Methoden und Beispiele, datasolut GmbH, Genter Straße 7, 50672 Köln. Zugriff am 06.08.2022 um 13:00 Uhr. Verfügbar unter: <https://datasolut.com/was-ist-machine-learning/>
- Zhang Y. & Jiang J. (2008) Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Journal Annual Reviews in Control* (Vol. 32), S. 229–252. Zugleich online im Internet, abgerufen am 17.08.2022 um 20:30 Uhr: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578808000345>

**Kontakt:**

Ing. DI Alexander Kühner, BSc  
Fachhochschule Burgenland GmbH  
Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld  
Steinamangerstraße 21  
A-7423 Pinkafeld, Österreich  
Tel. +43 5 7705-4140  
[Alexander.kuehrer@fh-burgenland.at](mailto:Alexander.kuehrer@fh-burgenland.at)



# Session 4a

## **Green Energy Lab – End User Integration**

### **Green Energy Foresight as a Method to Increase Research Impact**

Kurz, Supper / Green Energy Lab / AT

### **Car-sharing as use case for V2X? A perspective of fleet managers**

Ettwein / FH Technikum Wien / AT



# Green Energy Foresight as a Method to Increase Research Impact

C. Kurz, S. Supper

*Green Energy Lab, Wien, Österreich*

**ABSTRACT:** Green Energy Lab (GEL) is a model region with about 60 projects contributing 90 model solutions for a renewable energy system. GEL plays a strategically important role in developing and supporting the best possible technological solutions in collaboration with research, industry, customers, and climate change stakeholders. GEL is also responsible for preparing insights from its own sources, linking them with other knowledge sources, and providing valuable expertise to our stakeholders as strategic decision-making support. To fulfill these expectations and goals, the Green Energy Foresight (GEF) methodology was developed. It supports future-oriented decision-making processes by integrating diverse knowledge sources and embedding them in a continuous process.

GEF is divided into three levels of detail, ranging from an overview of all eleven innovation fields (RadarView), an insight into one of the innovation fields (OverView) to the topic-specific analysis of an individual technology field (DeepView). The GEF methodology and the RadarView 2023 will be presented, as well as initial derived findings. Additionally, we will show how GEF can increase efficiency in project development and create value for different stakeholder groups.

## 1 INTRODUCTION

Motivated by an intrinsic demand for strategic guidelines to develop and structure the research conducted within the GEL's portfolio of projects, the GEF methodology was developed. We will first describe the role GEF plays within the overall strategic development process of GEL and then discuss some of the benefits our networking partners and stakeholder can derive from it. Finally, in the methodology section, we will describe the foresight process we have developed.

A highly innovative project cluster ensures that GEL stays on-track of meeting its climate impact goals. The combined impact of all developed model solutions is measured in a standardized impact analysis (see Fig. 1) (Kurz 2022). Results from this analysis, together with a variety of input from our network and external experts, constitute the main input to GEF. Guidance derived from GEF, in turn, has a bearing on the idea selection and project development process.

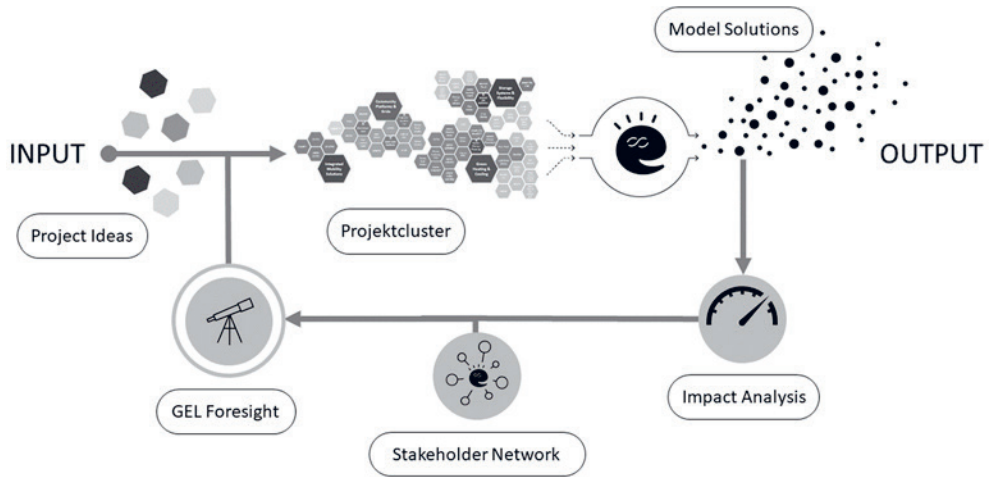


Fig. 1: The strategic feedback loop in Green Energy Lab.

To fulfill this task, GEF is conceived as a multi-modal, inclusive foresighting process that looks at technology innovations with a primary focus on Austria and Europe (without, however, neglecting the global perspective). In contrast to a forecasting approach, which attempts to predict the future, GEF aims to identify the hinge points, that is, those areas, where research and investment should be concentrated to achieve the most impact toward a sustainable energy system and, hence, the climate. In other words, GEF is a tool to shape the future rather than predict it.

Clearly, this type of information is not only valuable to evolve the project cluster of GEL but is also of significant interest to businesses and policy makers. Based on the results of GEF, we can address individual questions and provide specific strategic input, thereby enhancing the accuracy of decisions on a business level and increasing the impact of future research.

## 2 METHODOLOGY

To partition the vast area of energy system innovations, we started an open innovation process to define suitable innovation fields (IF), which resulted in a set of eleven IF:

1. Upgrading Buildings
2. Renewable Energy Sources
3. Flexibility
4. Green Heating & Cooling
5. Circular Economy
6. Hydrogen Economy
7. Data-Driven Processes
8. Smart Grids
9. Platform Economy
10. New Mobility
11. Climate Adaptation

Each IF represents an active area of innovation as part of the overall topic of energy systems. Collectively, the eleven IF form a basis upon which to cast different information layers such as the contributions of our project portfolio, the expertise of our partner network (the Innovator Circle, comprising more than 300 enterprises and institutions), the results of the SINTEG blueprint solutions (SINTEG 2023) or the number of select funding calls on the national and EU levels.

In order to quickly assess the overall characteristics of an IF and to establish a system with which to compare and contrast them, we further defined a set of six parameters along which each IF was graded by a group of experts:

1. *Technological readiness*: how mature are technologies contained in the IF in general?
2. *System readiness*: how close is the IF as a whole to function within an integrated energy system?
3. *Market opportunity*: how attractive is the market underlying the IF?
4. *Aggregated risk entering the IF*: overall, how risky would it be to expand into the IF (technology risk, market risk, policy risk)
5. *Climate benefit*: how large is the impact of the IF, taken as a whole, to benefit the climate?
6. *Enabler potential*: how interconnected is the IF with other IF, i.e., to which degree does the IF function as an enabler for other IF?

The GEL RadarView, shown in Fig. 2, provides an overview at one glance. It shows three of the parameters as well as four other sources of information cast onto the basis of eleven IF. An interactive version of the RadarView is accessible at our homepage (Green Energy Lab 2023).

The RadarView is well adapted to providing an overview of the IF, but to make informed decisions, more detailed insight into each IF is needed. To this end, we have added two progressively deeper levels of foresight: OverView and DeepView. The OverView report has the goal to identify and characterize technology fields that are innovation hotspots in the respective IF. It provides a concise introduction, identifies external key influencing factors for the IF, and groups the TF into three categories: watch, think, and act, according to their current imminence. A key feature of the OverView is that it is presented as an interactive weblink and encourages deeper exploration.

But what about an in-depth analysis of a particular TF? The DeepView, constituting the third and most detailed level of GEF, investigates a particular TF. It is based on the corresponding OverView but focuses on the identification of use-cases, significant projects, and players in the TF under investigation. The DeepView enables the reader to learn about a TF through applications and helps to get in touch with experts.

A unique property of the GEF is that it incorporates diverse sources of knowledge. As part of a year-round dedicated process, an updated iteration of the RadarView emerges along with other foresight reports. This can be summarized in a five-step process shown in Fig. 3. IF are re-evaluated along the six parameters by a group of experts chosen from inside and outside the GEL network. Using a dedicated AI-based research tool, we trawl a large data lake to identify relevant signals from the internet, international project databases, scientific publications, patent offices, EU and Austrian strategies and funding calls, etc. As a third step, we add results from the project portfolio and insights gleaned from interviews with partners of our community. The prototype RadarView and OverView reports are then reviewed by outside experts in a fourth step before finally being made available to our partners.

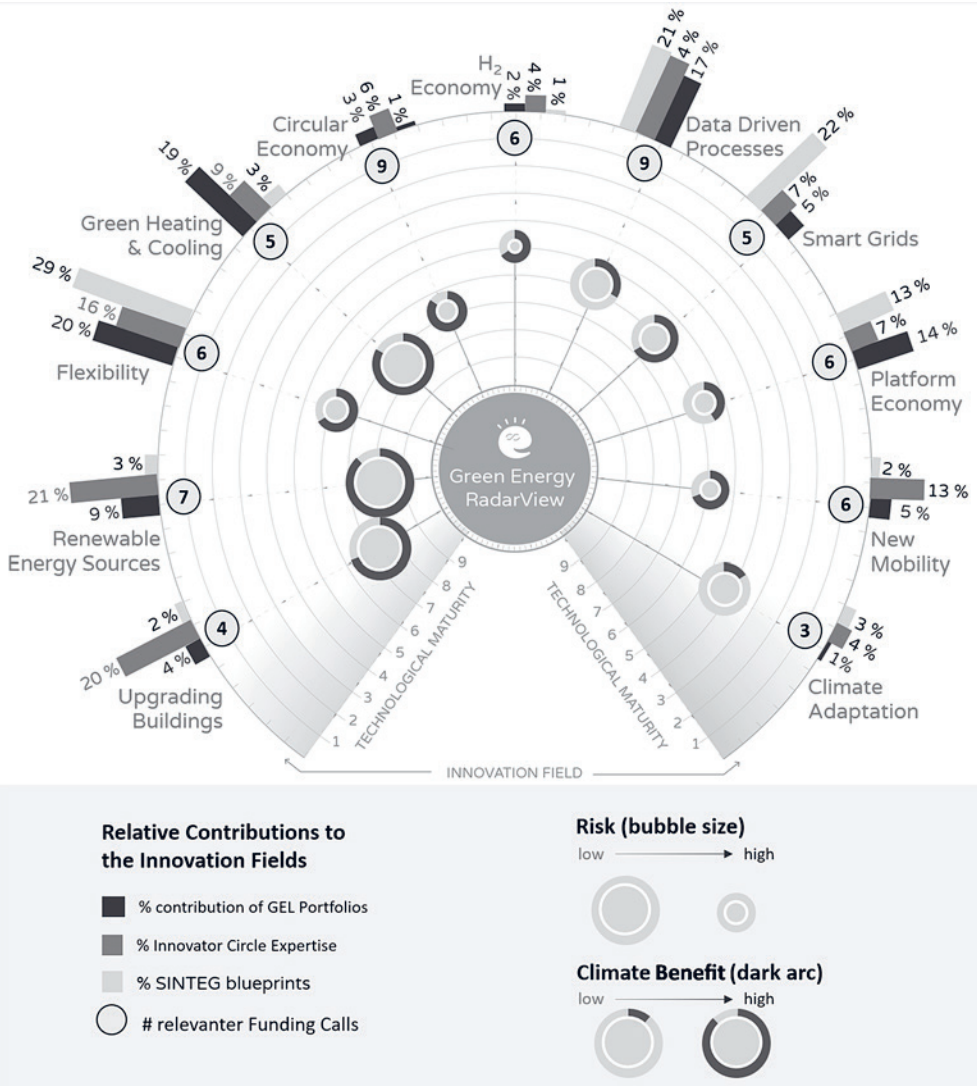


Fig. 2: In the RadarView, the eleven innovations fields provide a basis to organize other information sources. In addition, the RadarView allows for comparison of IF along the parameters technological readiness, climate benefit, and aggregated risk entering the IF.

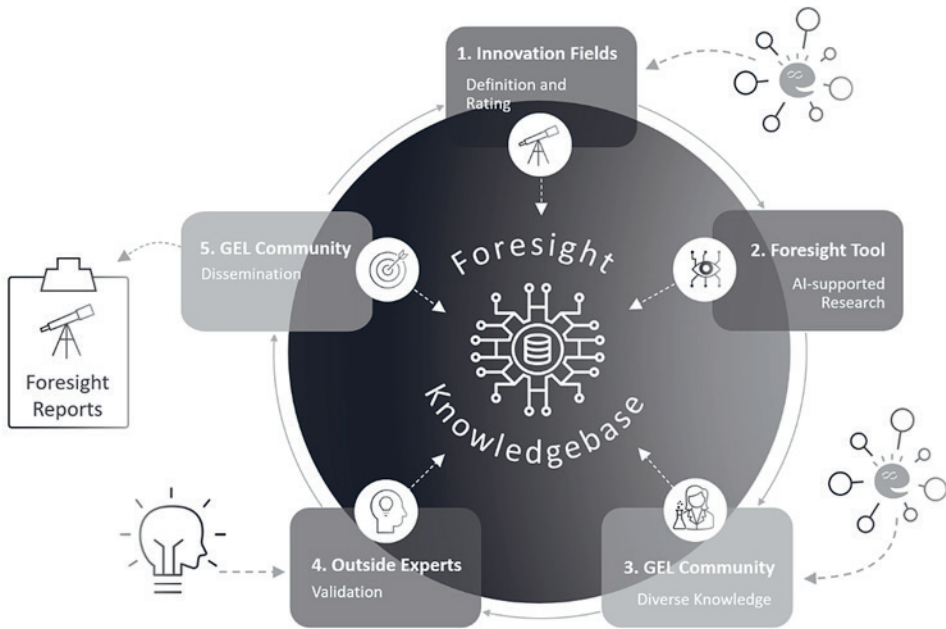


Fig. 3: Five-step year-round process for updating and enlarging the GEL foresight knowledgebase.

DeepView reports are prepared upon specific requests and in close collaboration with the network partner.

### 3 FIRST RESULTS

Next to individual foresight reports that are being generated according to the outlined process in the previous section, we have gained valuable input from the RadarView and the expert evaluation of the eleven IF. To illustrate, we present some interesting findings below.

In the sequence of three figures below (Fig. 4 through Fig. 6) we present three different views of the eleven IF, each of which representing a different premise. Fig. 4 plots the climate benefit vs. system maturity of the IF. It is evident, that Renewable Energy Sources and Green Heating & Cooling present the most mature and potent IF. In the second line, however, we see Circular Economy and Upgrading Buildings. To maximize the effect of research spendings, this view suggests focusing on Circular Economy and Upgrading Buildings since they are quite mature yet still in need of development to bring their system maturity up to par.

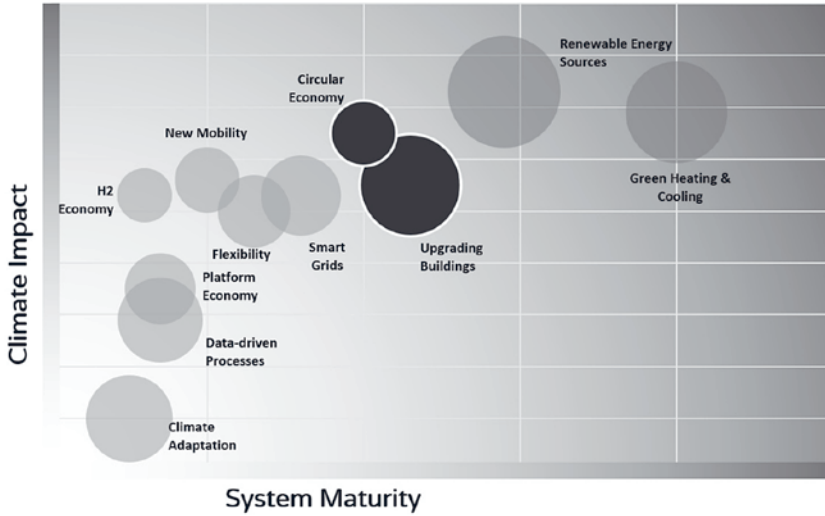


Fig. 4: Low hanging fruit. (Larger bubbles indicate smaller aggregate risk entering the IF.)

Since applied research is, to a large part, carried forward by funding from industry partners which need to monetarize the research results, the market view is another important consideration. Shown in Fig. 5 is climate benefit vs. market opportunity, which features the three IF Renewable Energy Sources, Green Heating & Cooling, and Upgrading Buildings as most attractive.

Considering the interconnectedness of IF, it pays to focus research in areas which stimulate progress in other IF. Graphing the enabler potential vs. technological maturity (see Fig. 6) it becomes clear that Flexibility, Smart Grids, and Data-Driven Processes are the IF that can leverage and stimulate innovations in many other IF.



Fig. 5: What the market says. (Larger bubbles indicate smaller aggregate risk entering the IF.)

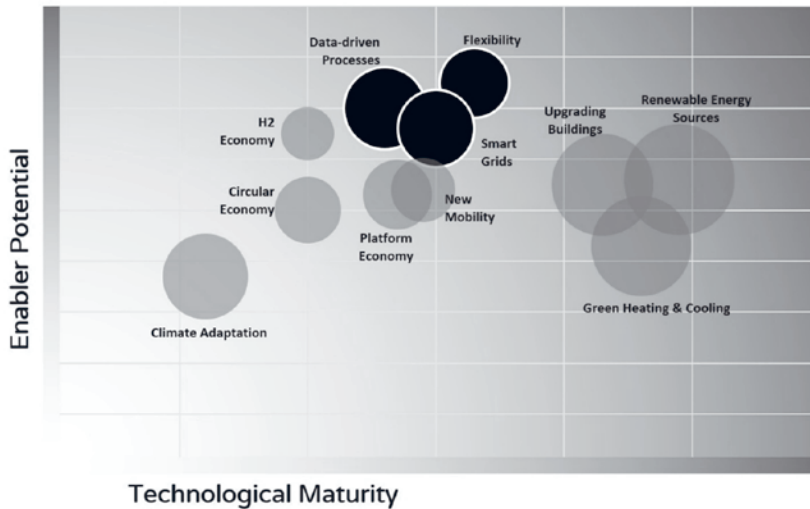


Fig. 6: Focus on the bottlenecks. (Larger bubbles indicate smaller aggregate risk entering the IF.)

## 4 CONCLUSION

Green Energy Foresight (GEF) has proven to be an immensely valuable tool in many areas. On one hand, in conjunction with results from an impact analysis of model solutions it directs the development of the project portfolio of Green Energy Lab (GEL). On the other hand, it has aroused much interest from partners and stakeholders of GEL, who apply GEL results to inform their own strategy decisions.

After a successful first year, GEF is now in its second year in which we focus to grow our knowledgebase through inclusion of more model solutions, as they become available. Furthermore, we are increasing our library of foresight reports and are finetuning the foresight process.

## LITERATURE

- Green Energy Lab. (2023, April 25). RadarView 2023. Retrieved from [www.greenenergylab.at](https://greenenergylab.at/innovationsfelder-rascher-erkennen-und-potenzial-nutzen/): <https://greenenergylab.at/innovationsfelder-rascher-erkennen-und-potenzial-nutzen/>
- Kurz C. (2022). Erste Ergebnisse einer Impact Analyse der Vorzeigeregion „Green Energy Lab“. 17. Symposium Energieinnovation. Graz.
- SINTEG. (2023, April 25). SINTEG. Retrieved from [bmwk.de](https://www.bmwk.de): <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/sinteg/>



# Car-sharing as use case for V2X? A perspective of fleet managers

F. Ettwein

*University of Applied Sciences Technikum Vienna, Resilient Energy Systems*

**ABSTRACT:** In order to gain knowledge on how Austrian sharing fleet operators face V2X applications for their e-car fleet, semi-structured interviews with eight Austrian car-sharing operators were conducted. Their general attitude towards V2X applications was analysed, as well as chances and hurdles for V2X implementation within their own car-sharing fleet and from the viewpoint of their customers. The results show, that all interview partners were generally aware of the topic but no one considered it currently viable for their own business. All respondents expressed a positive attitude towards V2X but there is scepticism whether car-sharing is eligible for this new business model. The main benefits for sharing operators include contributing to the energy transition and the positive environmental impacts (efficient use of renewable energy, increase share of renewables). Only one operator explicitly mentioned financial benefit as their sole motivation – this operator expects to enhance the profitability of cars that have a low occupancy rate. Despite the overall positive attitude towards V2X, operators desire more information on certain aspects of V2X for example technical procedures, eligible areas for deployment and possible benefits. In addition, the extent of cost savings and the impact on resale-value is not fully understood. The actual environmental benefit still has to be proven, especially as most operators already supply their fleets with green electricity, which minimizes potential for further improvement in CO<sub>2</sub> emissions.

## 1 INTRODUCTION

The integration of vehicle-to-everything (V2X) charging schemes into existing electric vehicles (EV) business models has yet to be widely investigated. V2X charging is expected to increase the profitability of EV business models (Zhang et al. 2021). The perception of private drivers and their willingness to take part in such business models is subject to several studies (e.g. Payne 2018; Bierman et al. 2016; Geske & Schumann 2018; Sovacool et al. 2020). Less attention is given to other business areas besides private, such as e-car-sharing operators, which can play an essential role in applying V2X. This leads to the research question, whether Austrian e-car-sharing fleet operators are ready for V2X and what framework conditions they require for accepting V2X within their business models.

## 2 METHODOLOGY

In order to gain knowledge on how Austrian sharing fleet operators face this topic, semi-structured interviews with Austrian car-sharing operators were conducted. Eighteen sharing companies were contacted with the request for an interview. Eight agreed, one declined as V2X is not relevant for that company and nine did not respond. The interviews were conducted in October and November of 2021 with an average duration of 50 minutes. These eight car-sharing companies vary in their business strategies and their emphasis on V2X. Tab. 1 shows an overview of the interview partners. The interviews were transcribed and analysed by means of a qualitative content analysis (Mayring 2015) using MaxQDA 2020.

Tab. 1: Overview of interviews

Interviewee	Type of Sharing Provider	Number of EVs in Sharing Program
I3, I4, I7	Small regional initiatives, driven by clubs	2 – 5
I2, I8	Small to medium regional initiatives, driven by (not-for-profit) companies	6 – 12
I1, I5, I6	Large initiatives incl. full-service offer	30+

### 3 RESULTS

All interview partners were generally aware of the topic; however, no one considered it currently viable for their own business. Only one interviewee stated that the company already did research on possibilities to integrate V2X into their own business model, but declined its implementation due to technical and legal issues (I1). The others, especially smaller sharing providers, mentioned private interest and awareness of the general principle of operation. The level of knowledge varied among the interviewees. Some respondents were well informed on potential use cases, benefits (e.g., grid-support, marketing of flexibilities, self-consumption optimization), technical and financial aspects (e.g., range of revenue achievable) (I1, I4, I6, I7, I8), which demonstrates general V2X knowledge and understanding of the energy sector. Others had only basic information on the concept, and were not aware of possible applications and overall benefits (I2, I3, I5). Still, all operators were interested into V2X.

#### 3.1 CURRENT STATE & INTEREST OF SHARING OPERATORS

All respondents expressed a positive attitude towards V2X. However, three respondents were sceptical that car-sharing is an appropriate application for V2X and would at present reject implementing it. This is mainly due to the high occupancy rates within car-sharing, which limits the availability of the battery for any other use other than driving (I3, I4, I5). They would be open towards V2X for their fleets, if its viability for car-sharing is proven. The other five respondents showed an overall positive attitude and are interested in its implementation.

Respondents were quite open towards different applications of V2X. Using EV batteries for the optimization of self-consumption (for municipality, company or multi-apartment building) was of particular interest (I1, I2, I4, I5, I6). Flexibility services offered to third parties to support the grid were also rated positively. However, challenges exist in explaining these services to customers. Two respondents assume, that a better understanding of these concepts could increase acceptance of e-mobility and car-sharing (I1, I4). Also two respondents were interested in using V2X as an emergency power supply (I4, I5) and one respondent expressed interest in integrating V2X charging into energy communities (I3).

#### 3.2 MOTIVES AND CHALLENGES

The *main benefits* for sharing operators include contributing to the energy transition and the *positive environmental impacts* (efficient use of renewable energy, increase share of renewables) (I1, I2, I5, I7). Only one operator explicitly mentioned financial benefit as their sole motivation – this operator expects to enhance the profitability of cars that have a low occupancy rate (I7).

Opinion regarding the *challenges* of V2X differ among the interviewees. While some do not see any challenges at all (once a legal framework is established) (I7), others believe that V2X will not be feasible with e-car-sharing fleets due to the unpredictability of availability, the need for flexibility of bookings and high occupancy rates of the EVs (I3, I5). As a counter argument, some operators point to their data base of past bookings which can facilitate planning of charging management (I6). Despite the

overall positive attitude towards V2X, operators desire *more information* on certain aspects, for example: technical procedures, eligible areas for deployment, and possible benefits. In addition, the extent of cost savings (I4) and the impact on resale-value is not fully understood (I1, I8). The actual environmental benefit still has to be proven (I4), especially as most operators already supply their fleets with green electricity, which minimizes potential for further improvement in CO<sub>2</sub> emissions. Six operators were concerned, that the *driving function* of their fleet would suffer from V2X. Their primary business model and thus top priority is ensuring that vehicles can be rented. As such, a charged car must be available when needed (I2, I3, I4, I5, I6, I8). Three respondents consider their *fleet too small* or too dispersed for an efficient implementation of V2X. They are concerned that their small vehicle fleet cannot recuperate the initial investments of time and money (I3, I6, I8). Furthermore, any additional *administrative burden* in daily business would be troublesome (I8). *Company and site-specific aspects* can also pose a challenge to V2X. Existing partnerships may limit a car-sharing provider's ability to implement new business models such as V2X. Such limits might include: existing contracts with charging infrastructure providers, space constraints and parking contracts (I4). For example, some car sharing providers already utilise an existing public charging network free of charge (I8).

*Capacity loss* of the battery can be a challenge. Information and evidence on the extent of battery degradation is needed (I1, I2, I4, I8), especially for older vehicles with lower initial battery capacity. Others however are not concerned about capacity loss (I7). The *compatibility* of different charging systems must be ensured; different charging systems at different sharing sites may confuse the end user (I4). Some concern exists regarding the reliability of V2X technology and its control systems (I8). Awareness building and education is needed. The development of a sufficient *regulatory framework* is a precondition for all respondents. They see the challenge to integrate V2X into the already complex standards of the energy and mobility sector. The matter of *warranty* is relevant for some operators. All except for two operators are non-for-profit organisations. *Financial aspects* therefore are of minor importance to them. A cost-covering V2X operation would be an option for all interviewees. Three respondents would even be willing to accept additional costs, if environmental benefits of V2X charging can be demonstrated (I2, I5, I7).

### 3.3 GOVERNANCE & REQUIREMENTS

Regarding an implementation of V2X in e-car-sharing fleets, three respondents were sceptical, whether car-sharing can be an appropriate application for V2X. Ensuring adequate flexibility in bookings (short-term bookings and unpredictability of bookings) as well as guaranteeing an adequate vehicle state of charge (SOC) present significant governance challenges (I3, I4, I5). Even if customers were obliged to state the length of their planned trip, driving style and road conditions may still greatly affect actual battery consumption and range. For one interviewee the idea of V2X actually contradicts the idea of car-sharing fundamentally: car-sharing aims for high occupancy rates and low downtime - users are even educated to minimize downtime during their rental period. In order to reduce such conflicts, a transparent communication would be necessary (I3).

Historical data for planned trips can aid in the implementation of efficient V2X charging strategies. For efficient charging and discharging strategies, respondents claim for limits, which they can determine on their own. The most important thereof are minimum range and capacity reserved for V2X services. Regarding the minimum range, that operators want to offer their customers for driving at any time, the general tendency is a minimum SOC of 70 %. However, this is a general average. The minimum SOC is car and time (time of day) dependent for V2X charging and the respective services that V2X should support (I2, I6, I7). In particular, the following estimations were given for regular business hours: 50 km at any time (I3); 100 km at any time and higher range before scheduled bookings (I4); never beyond 50 %, regular SOC of 70 – 80 % (I6), 80 % (I7, I8) or 100 % (I5).

Regarding the capacity operators would reserve for V2X markets / services, there is a strong difference between night and day applications (regular business hours). For night-time usage, most respondents would not limit the discharging capacity, as long as the vehicle reaches approximately 80 % SOC

for its first booking (typically in the morning). Within the regular business hours, operators estimate about 20-30 % of battery capacity could be used for V2X (I6, I7, I8). One interviewee found it unnecessary to define a maximum SOC-reserve for V2X markets/services as long as the customers (drivers) are ensured to have enough energy for their next trip (I3). Tab. 2 shows a summary of desired settings for governance by car-sharing fleet operators.

Tabl. 2: *Desired settings by car-sharing fleet operators*

Desired settings	Source
Day- and car-dependent control of all settings	(all)
General minimum SOC	(all)
Maximum battery capacity reserved for V2X	(I1, I6, I7, I8)
Minimum SOC before start of each renting period), ideally in combination with planned trip length	(I1, I6, I7, I8)
Dedicate / block times for discharging	(I4, I7)
Minimum remuneration (e.g., based on electricity prices), based on this setting, bidirectional use would be permitted or locked	(I6)
Fixed time slots or durations for bidirectional use of the EVs cannot be guaranteed	(I6)

### 3.4 CUSTOMERS NEEDS FROM THE OPERATOR'S PERSPECTIVE

At present, car-sharing is still a niche product and not widely used by the general public. The assessment of driver's interests is somewhat hampered by the fact that few operators can define a "typical" customer in terms of his/her motivation (e.g. environmental and financial) and usage (e.g. rental frequency and trip length). Most interviewees agree, that V2X will be an additional asset for customers with strong environmental motives (I1, I3, I5, I6, I7), but expect little to no effect on other customers. Three respondents believe, that V2X will not be of interest to any customer, unless there is a financial benefit (I2, I5, I8). As an add-on feature V2X is not a decisive argument for the choice of a particular vehicle within a sharing-pool, as other aspects such as price, vehicle range or trunk capacity are of greater importance (I3).

Most operators do not believe that customers are willing to accept additional costs for vehicles participating in V2X programs, even if environmental or societal advantage are proven and communicated effectively (I1, I2, I6, I7, I8). Only a marginal share of customers, which have very strong ecological values are expected to be willing to accept additional costs for V2X (I1, I2, I6, I7). According to one respondent, customers have high standards and expect a minimal effort on their own behalf; which is supported by other respondents. Interviewees state, that any additional effort required by the customer will hinder the acceptance of V2X (I1, I4, I5, I6). But if V2X affects the customer in any manner, the benefit for the end-user must be evident and clearly communicated (I6).

Customers' *range anxiety* may be a challenge. Some customers are already sceptical of using EV due to their actual or perceived limited driving range. Reducing it via V2X services may exacerbate range anxiety (I4, I8). On the other hand, battery ranges continue to increase with new EVs. Two operators therefore believe that customers will not mind any reduced range (I6, I7). A lack of trust in V2X technology might lead drivers to fear that their vehicle will not be adequately charged when it's needed (I4).

Operators representing Full-Service-Providers, which offer municipalities complete car-sharing services, believe that these customers are interested in V2X charging (I6). As municipalities often have

an existing PV installation, V2X could provide additional environmental and economic benefits by increasing self-consumption. However, often smaller townships/counties have already turned down car-sharing projects (without V2X), based on their real and perceived complexity (15). This highlights the importance of keeping V2X solutions simple. Any additional financial or administrative burden could risk the viability of these projects.

## 4 SUMMARY AND CONCLUSION

In general, all respondents expressed a positive attitude towards V2X. However, for most interviewees, this is still a future endeavour as there are several technological and regulatory aspects that require further clarification. Additional insights and first-hand experience are needed to demonstrate the viable implementation of these business models. Such information may include financial analysis, site implementation guides, best practices, and acquiring and maintaining a customer base. Furthermore, the majority of sharing operators do not apply controlled charging mechanisms, which could be an entry point for V2X.

The most important findings from the expert interviews are summarized as follows: Operators are aware of V2X and attitudes towards V2X are generally positive. There is scepticism on the viability of car-sharing as an application for V2X as both concepts aim at increased vehicle use and may exhibit mutually adverse effects. Environmental benefits and the increased use of renewables are the most important motives for operators. As such, scientific evidence on the actual impact of V2X is needed. Additional education and information will likely increase acceptance and willingness to implement V2X within sharing fleets. Operators must be assured that their core-business will not be negatively affected. Operators are primarily concerned with: (a) Proof of actual environmental impact, (b) evidence on the effective financial impact with regard to different use cases, (c) necessary fleet size for viable V2X operation and (d) evidence regarding any additional loss of capacity to the vehicle's battery.

In conclusion, despite the overall positive attitude towards V2X in general, fleet managers are highly sceptical when it comes to V2X application for their e-car pool. Demonstration of the eligibility of sharing fleets for V2X business models is needed in order to eliminate barriers. Operators' needs (and their customers' needs) regarding range and plug-in time are to be considered.

*Acknowledgement:* This study was conducted within the project Car2Flex. This project is supported with the funds from the Climate and Energy Fund and implemented in the framework of the RTI-initiative "Flagship region Energy".

## LITERATURE

- Bierman P., Kroon C. von Loon R., & Arghi Y. (2016) Key Innovation Forms—Integration of Electric Vehicles and Vehicle to Grid (V2G) (Project Deliverable D2.1). Hespul. <http://www.cityzen-smart-city.eu/wp-content/uploads/2016/01/cityzen-kif-lian-integration-v2g.pdf>, 12.04.2023.
- Geske J. & Schumann D. (2018) Willing to participate in vehicle-to-grid (V2X)? Why not! In: Energy Policy 120, pp. 392–401.
- Mayring P. (2015) Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken, 12., überarb. Aufl. Weinheim Basel: Beltz.
- Payne G. (2018) Understanding the True Value of V2G. An analysis of the customers and value streams for V2G in the UK. Cenex: Loughborough. Available at: <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2019/10/True-Value-of-V2G-Report.pdf>, 12.04.2023.
- Sovacool B. K., Kester J., Noel L. & Zarazua de Rubens G. (2020) Actors, business models and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2X) technology: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 131, p. 109963.

---

Zhang Y., Lu M. & Shen S. (2021) On the values of vehicle-to-grid electricity selling in electric vehicle sharing. *Manufacturing & Service Operations Management* 23(2), pp. 488-507.

Kontakt:

Frederike Ettwein

Fachhochschule Technikum Wien

Höchstädtplatz 6

A-1200 Wien, Österreich

Tel. +43 1 333 40 77-6678

[frederike.ettwein@technikum-wien.at](mailto:frederike.ettwein@technikum-wien.at)

[www.technikum-wien.at](http://www.technikum-wien.at)

# Session 5a

## **Green Energy Lab – Green Heating & Cooling**

### **Prognosebasierte Regelung für Heizen und Kühlen im Gebäudesektor**

Kling, Wolf, Keller, Pröll / BOKU Wien / AT

### **Sani60ies - Fassadenintegrierte Bauteilaktivierung im Bestandsbau**

Keller, Wolf, Kling, Pröll / BOKU Wien / AT

### **Thermische Bauteilaktivierung und elektrische Speicher in Solar Energie Gebäuden**

Gumhalter, Ramschak / AEE INTEC / AT

### **Effiziente Booster/Basic-Wärmepumpen-Konzepte für die Sanierung**

Zotter / AEE INTEC & FH Joanneum / AT

# Die Zukunft der Messtechnik FLUXUS® Energy



## Eingriffsfreies Energiemonitoring Ideal zur ISO 50001 Auditierung DAMPF / DRUCKLUFT / WÄRME / KÄLTE

### 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  
Standorte: Olbendorf & Pregarten (OÖ)  
office@medon.at | www.medon.at

**medon**  
MESS.SYSTEME

# Prognosebasierte Regelung für Heizen und Kühlen im Gebäudesektor

B. Kling, M. Wolf, T. Keller, T. Pröll  
*Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich*

**ABSTRACT:** Buildings with component activation are capable of storing large amounts of thermal energy and releasing it to the residential units. One challenge in controlling component-activated buildings is the inertia caused by the high storage masses. This makes it difficult to respond to weather events, such as high solar irradiance, and results in the desired room temperature being exceeded or undershot. Model predictive controls process local weather data, project the expected environmental events onto a digital twin of the building under consideration, and can thus predictively send heat into the building via the heat generators. A heating vector for the next 48 hours is calculated, taking into account solar inputs or secondary conditions such as wind peak shaving. With a comfort optimization or a cost optimization, a heating power specification is then passed on to the heat generator. The calculation is repeated every hour.

This paper describes the practical implementation and operation of a model predictive control system on existing demonstration buildings. Data from monitoring the operation and from simulations are analysed, which subsequently form the basis for possible extensions of the functions. First results show that the concept works and is able to maintain set comfort conditions

## 1 EINLEITUNG

Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors ist ein wichtiger Meilenstein für Österreich, um die Klimaziele 2030 und 2050 erreichen zu können (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019; BMK 2023). Eine wichtige Grundlage für nachhaltige und klimafreundliche Neubauten ist die thermische Bauteilaktivierung. Diese ermöglicht es, Heizenergie mit einer niedrigen Vorlauftemperatur großflächig in die jeweiligen Wohneinheiten zu übertragen. Durch dieses System wird die aktivierte Baumasse zu einem großen Wärmespeicher, der eine große Menge an Wärmeenergie aufnehmen und abgeben kann, ohne dass die Temperatur im Betonkern stark schwankt. Basierend auf diesem System wurde ein Regler entwickelt, der in der Lage ist, Umwelteinflüsse wie z.B. die Sonneneinstrahlung für einen Zeitraum in die Zukunft zu erfassen und auf Basis dieser Prognose den Wärmeeintrag in die Bauteilaktivierung so zu steuern, dass eine deutliche Über- oder Unterschreitung der gewünschten Solltemperatur verhindert wird. So wird beispielsweise die Sonneneinstrahlung aktiv zur Temperaturregulation genutzt. Weitere Funktionen, wie z.B. die Einbeziehung von Windspitzenstrom, können durch Erweiterungen und Randbedingungen in die prognosebasierte Regelung (MPC) integriert werden.

### 1.1 DESIGN UND FUNKTION DES MODELPRÄDIKTIVEN REGLERS

Die Modellprädiktive Regelung (MPC) besteht aus mehreren Teilen, die miteinander interagieren. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau des MPC:

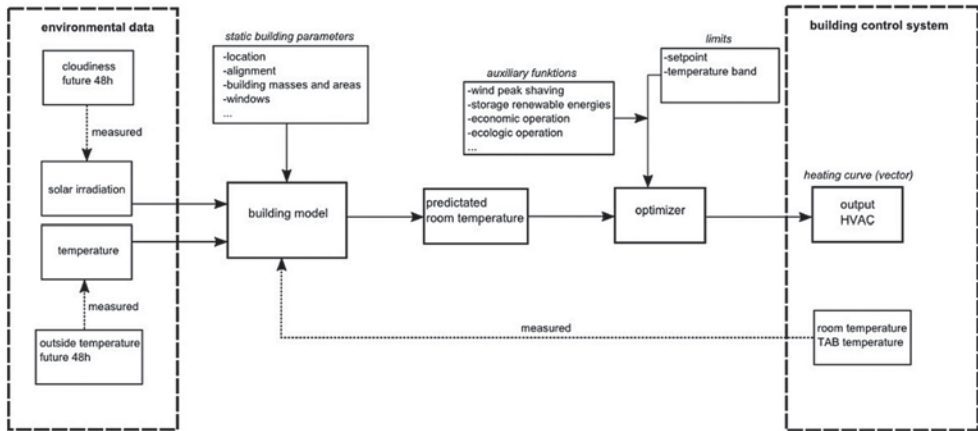


Abb. 1: Schematischer Aufbau des MPC

Im ersten Teil werden Umweltdaten abgefragt. Dafür werden lokaler Bewölkungsgrad und Außentemperatur für die nächsten 48 Stunden von einem Web-Service abgefragt. Über den Bewölkungsgrad kann die solare Einstrahlung abhängig von Ort, Tages- und Jahreszeit errechnet werden (Quaschnig 2011). Diese Informationen werden als externe Einflussgrößen in ein Gebäudemodell gespeist. Das Gebäudemodell beinhaltet die wichtigsten Parameter, die das Gebäude quantitativ beschreiben, wie etwa geographischer Ort, Ausrichtung, Gebäudemasse, thermisch aktivierte Flächen und Fensterflächen. Über dieses Modell mit seiner klar definierten Systemgrenze wird die Energiebilanz gebildet, unter Rücksichtnahme der externen Einflussfaktoren Außentemperatur und solarer Einstrahlung. Weiters in das Gebäudemodell fließen Messwerte der aktuellen Raumtemperatur und die Temperatur der thermisch aktivierten Decke (TAB). Aus diesem Gebäudemodell errechnet sich über die Energiebilanz ein prädiktiver Raumtemperaturvektor für die nächsten 48 Stunden. Die Aufgabe des Optimierers, der den nächsten Schritt darstellt ist es, diese prädiktive Raumtemperatur mit der von der Nutzerin eingestellten Soll-Raumtemperatur abzugleichen und dem Heizsystem eine Heiz- oder Kühllast vorzugeben. In der Basisversion des MPC wird die Abweichung vom Komfortoptimum (Soll-Temperatur des Nutzers/ Nutzerin) durch Minimierung der Fehlerquadratsumme ermittelt. Dabei wird die Differenz zwischen Soll- und Ist-Temperatur quadriert und in Folge minimiert (1):

$$f(\vec{x}) \sum_{i=0}^{n=48} (T_{soll,i} - T_{ist,i}(\vec{x}))^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Ergebnis der Optimierung ist ein Heiz/Kühlvektor für die nächsten 48 Stunden. Das erste Element dieses Vektors wird an das Wärme- und Kälteerzeugersystem übergeben und stellt den Heiz- oder Kühlenergiebedarf der folgenden Stunde dar. Jede Stunde wird dieser Prozess vom MPC in folgenden Schritten wiederholt:

1. Abfrage Wetterprognosedaten und Raumtemperatur
2. Berechnung solarer Einstrahlung
3. Berechnung der prädiktiven Raumtemperatur für die nächsten 48 Stunden
4. Optimierung
5. Übergabe Heiz/Kühllast an das Wärme- und Kälteerzeugersystem

## 1.2 GEBÄUDEMODELL

Das Gebäudemodell ist der zentrale Bestandteil des MPC. Bei Neubauten sind Aufbau der Wände und verwendete Baumaterialien bekannt. Das macht das Errechnen der thermischen Speichermasse  $C_{p,R}$  des Gebäudes möglich. Besonders zu berücksichtigen ist die Wärmespeicherfähigkeit der thermisch aktivierten Bauteile  $C_{p,TAB}$ . Die solaren Einträge  $\dot{Q}_{Solar}$  sind abhängig von Ausrichtung und Größe der Fenster, sowie der Sonnenstrahlung, die von Bewölkung, Tages- und Jahreszeit beeinflusst wird. Konvektions- und Lüftungsverluste  $\dot{Q}_{Conv}$  stellen die Verluste die Wärmeverluste des Gebäudes in der Heizperiode dar. Bei Lüftungssystemen lassen sich diese Wärmemengen gut berechnen. Das Modell ignoriert schlecht berechenbare Störgrößen  $\dot{Q}_{Dist}$ . So werden Größen wie interne Gewinne durch elektrische Geräte oder Wärmeverluste durch Lüften via Fenster oder Türen nicht im Modell berücksichtigt.

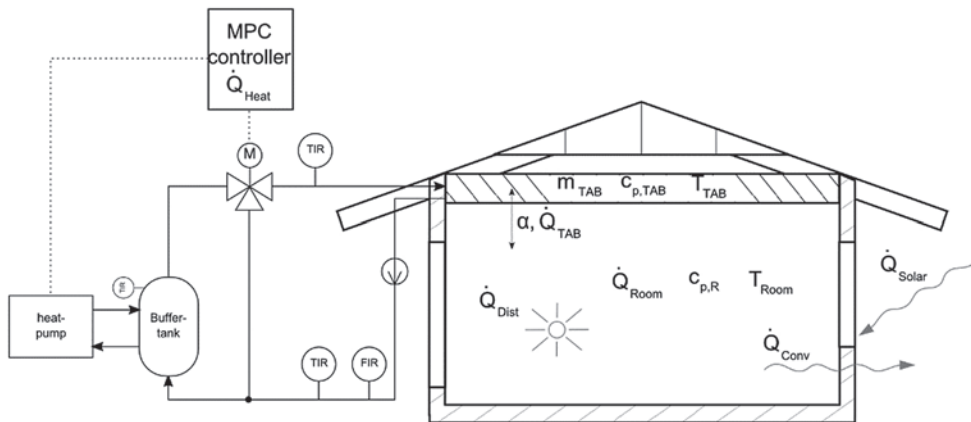


Abb. 2: Schema Wirkkreis MPC und Aufbau Gebäudemodell

## 1.3 HARDWARE

Die Hardware für den MPC besteht aus mehreren Komponenten, die miteinander interagieren.

Die Logik, die die Berechnungen und Optimierung durchführt wird auf einer Recheneinheit ausgeführt. Da der MPC in seiner aktuellen Form kein Machine Learning oder hochauflösende Gebäude-Modelle hinterlegt hat, können die Anforderungen an die verwendete Recheneinheit niedrig gehalten werden. Durch den modularen Aufbau, geringe Kosten und Größe eignen sich Einplatinen-Computer, wie RaspberryPi- oder Arduinomodelle, um die Anforderungen abzudecken. Diese Recheneinheit hat eine LAN oder WLAN Schnittstelle, die das Abfragen von Wetterprognosedaten ermöglicht und einen Fernzugriff für Wartung und Monitoring ermöglicht. Mittels eines Erweiterungsmodul ist es möglich, die Recheneinheit in ein Controller Area Network (CAN) Bus-Netzwerk zu integrieren. Über dieses Netzwerk kann mit frei programmierbaren Reglern sowie mit den Wärme- und Kälteerzeugern kommuniziert werden.

Die Regler stellen die zweite wichtige Hardwarekomponente dar. Diese werden in zukünftige Projekte über das CAN-Bus Netzwerk mit der Recheneinheit verbunden. Die Temperaturfühler und Durchflussmesser der einzelnen Wohneinheiten sind an diese frei programmierbaren Regler angeschlossen. Ebenfalls über CAN-Bus kommuniziert der Regler mit dem Bedienelement der einzelnen Wohneinheiten, über denen die Sollwert-vorgabe für die Raumtemperatur erfolgt. Im Demonstrationsobjekt in Purkersdorf kommuniziert der Einplatinencomputer direkt mit der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) über einen File Transfer Protocol (FTP) Server. Die Regler kontrollieren die Wärme- oder Kältemenge, die über die TAB in die jeweilige Wohneinheit geschickt wird, über eine Pumpenmisch-

gruppe oder einen Volumenstromregler, die direkt angesteuert werden können.

Die Sensorik ist elementarer Bestandteil der Regelung und befindet sich an Schlüsselstellen des Wärmenetzes. Temperaturfühler werden im später beschriebenen Demonstrationsobjekten vom Typ Pt100 in einer Vierleiter-Schaltung. Das minimiert Messfehler auch bei längerer Verkabelung (Bentsman 2022). Diese werden kalibriert und am Regler angeschlossen. Ein Ultraschall-Durchflussmesser wird in Kombination mit dem TAB VL und TAB RL Temperatursensoren für die Berechnung der Wärme- oder Kältemenge in die Wohneinheit genutzt. Im Vergleich zu einem Wärmemengenzähler hat diese Methode den Vorteil, dass sie bei genauer Kalibrierung der einzelnen Sensoren auch sehr kleine Temperaturspreizungen ( $< 3\text{K}$ ) genau erfassen und Wärmemengen akkurat darstellen kann (Henning 2011).

#### 1.4 BASIS- UND ERWEITERUNGSFUNKTION

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben besteht die Optimierung in ihrer Basis-Variante aus einer Komfortoptimierung, die bestrebt ist, die Sollwertvorgabe vom Bedienelement unter Berücksichtigung der solaren Einstrahlung möglichst genau einzuhalten.

Wird vom Ansatz der geringsten Sollwertabweichung etwas Abstand genommen, kann der MPC zusätzliche Funktionen erfüllen. Dafür stellt die NutzerIn ein gewünschtes Temperaturband ein. Dieses repräsentiert den akzeptierten Bereich in dem sich die Raumtemperatur bewegen darf. Mit dieser frei gewordenen Flexibilität lässt sich eine Vielzahl von neuen Anwendungen für das Heiz/Kühlsystem bewerkstelligen. So kann etwa Wind-Peak-Shaving (WPS) genutzt werden, um Windstromspitzen für die NutzerIn ökonomisch sinnvoll in der Gebäudehülle einzuspeichern. Andere Modi lassen den  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck durch Verwendung von volatilen, erneuerbaren Energiequellen, wie etwa einer lokalen Photovoltaikanlage sinken. Diese Funktionen machen ein Umstrukturieren der zugrundeliegenden Optimierung notwendig.

Die Optimierung soll auf einer Kostenfunktion aufbauen. Es werden 2 Konstanten ermittelt,  $f$ - und  $f\pm$ . Diese geben an, wie stark ein Über- oder Unterschreiten des Temperaturbandes mit Kosten [ $\text{€/K}^2$ ] beaufschlagt wird. Diese Kosten werden zu den Energiekosten addiert. Die Summe der Energiekosten, die für die Heizwärme- oder Kältebereitstellung aufgewendet werden müssen und die Kosten der Temperaturabweichung ergeben die Gesamtkosten. Die Kostenfunktion gilt es in der Optimierung zu minimieren.

#### 1.5 DEMONSTRATIONSOBJEKT PURKERSDORF

Das erste Demonstrationsobjekt für den MPC wurde 2018 in Purkersdorf, Niederösterreich in Betrieb genommen. Es handelt sich um ein Doppelhaus mit 2 Wohneinheiten (Top 1 und Top 2). Das Gebäude befindet sich in Hanglage mit großen Fensterflächen gegen Süden orientiert. Die Wärme/Kältebereitstellung erfolgt über eine 18 kW Erdwärmepumpe, die das Doppelhaus über die TAB mit Wärme in der Heizsaison und aktiver Kühlung in der Kühlsaison versorgen kann. Der MPC in seiner Basisfunktion als Komfortoptimierer wurde in Betrieb genommen und die Daten im Rahmen eines technischen Monitorings aufgezeichnet und ausgewertet.

#### 1.6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Ziel des technischen Monitorings in Purkersdorf ist es, ein besseres Verständnis für den praktischen Betrieb des MPC zu erlangen und nachzuweisen, dass Komfortparameter eingehalten werden können.

Der Temperaturkomfort ist individuell. In Anlehnung an DIN EN ISO 7730:2005 (DIN 2005) wird das untere Limit auf  $20\text{ °C}$  und das obere Limit auf  $24\text{ °C}$  gesetzt. Folgend werden die Ergebnisse für die Wohneinheit TOP1 präsentiert. Diese Wohneinheit besitzt exponiertere Fensterflächen als TOP2. Störgrößen, wie solare Einträge können hier größeren Einfluss auf Temperaturverläufe haben und mögliche Schwachstellen des MPC besser aufzeigen.

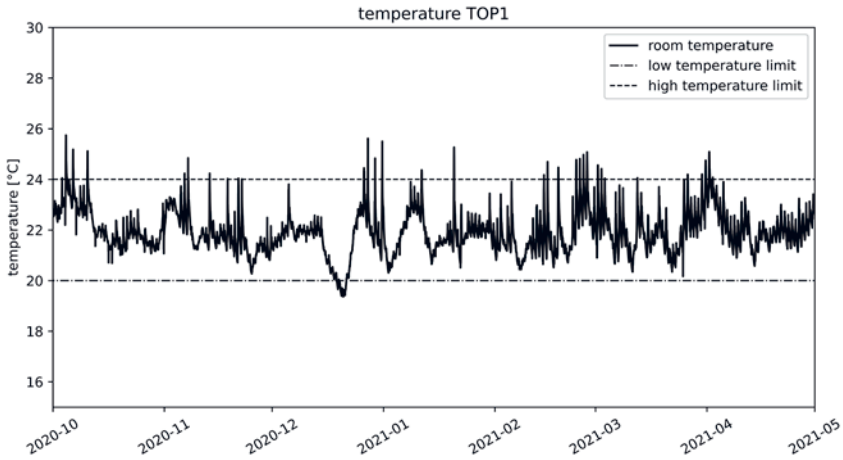


Abb. 3: Temperaturverlauf der Heizperiode 2020/2021

Abb. 3 zeigt die Heizperiode 2020/2021. Die Raumtemperatur bewegt sich fast immer im zuvor definierten Bereich zwischen 20 °C und 24 °C. Einige Spitzen überschreiten das obere Temperaturlimit. Wie Abb. 4 zeigt, unterschätzt der MPC die solare Einstrahlung in diesen Fällen, und die Raumtemperatur wird durch die Summe aus solaren Einträgen und zu viel eingebrachter Wärmemenge durch die TAB über die obere Grenztemperatur aufgeheizt.

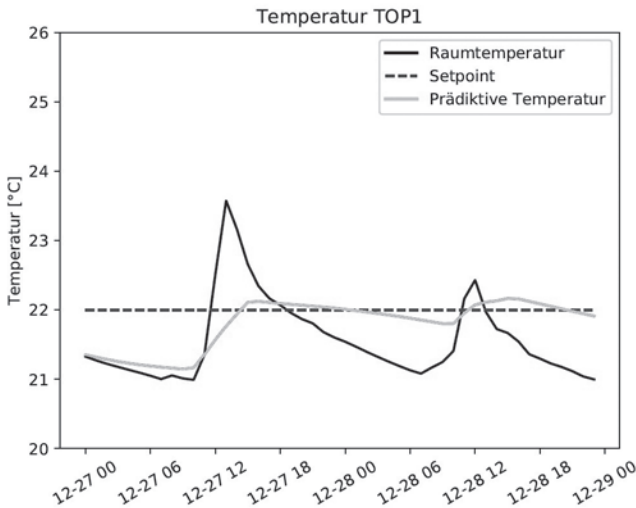


Abb. 4: Unterschätzung des solaren Eintrags anhand der prädiktiven Temperatur und der tatsächlichen Temperatur

In der Kühlperiode fällt auf, dass in den wärmsten Sommermonaten die Temperaturobergrenze Großteils durchgehend überschritten wird. Dies kann einerseits durch unzureichende Kühlung, unter-

schätzte solare Einstrahlung, oder eine erhöhte Solltemperatur durch den/die NutzerIn ausgelöst worden sein. Genauere Analysen für den Kühlperiode stehen noch aus. Abb. 5 zeigt die erhöhte Temperatur in den Sommermonaten nach zuvor gesetzten Parametern:

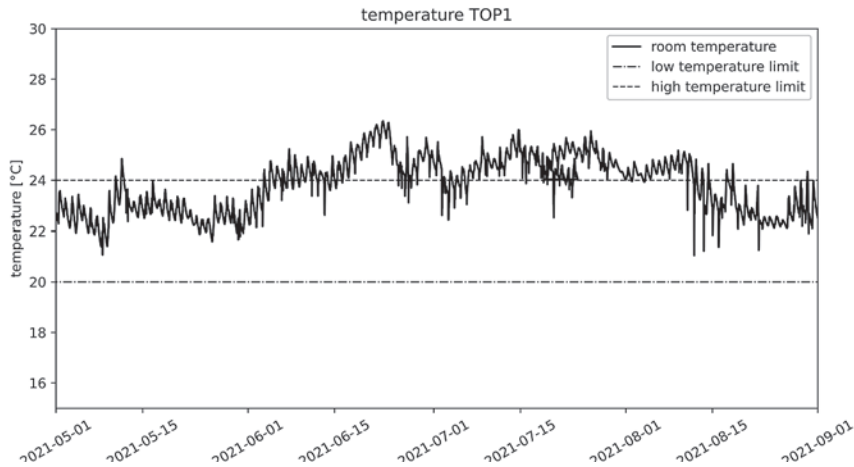


Abb. 5: Temperaturverlauf der Kühlperiode 2020/2021

Abschließend lässt sich sagen, dass das Gebäude sich durch die großen Fensterflächen gut eignet, um den Effekt von solarer Einstrahlung auf die Raumtemperatur zu untersuchen. Die Verschattung dieser Fensterflächen ist ein großer Faktor, der die Regelung empfindlich stören kann und meist durch menschliches, damit unberechenbares, Eingreifen erfolgt. Angesichts der Erderwärmung ist fragwürdig, ob Wohnraumkühlung in Sommermonaten auch mit 26 °C Zieltemperatur ausreichend ist. Das liegt einerseits an den gegebenen Kühlmöglichkeiten, als auch an der Raumnutzung.

## 1.7 AUSBLICK

Der nächste Schritt in der Forschung rund um den MPC ist das Up-scaling. Ziel dabei ist es, einzelne Wohnungen in Neubauten mit der prädiktiven Regelung auszustatten und miteinander zu vergleichen. Die in Kapitel 1.4 beschriebenen Zusatzfunktionen sollen praktisch getestet werden.

Im „Alpenland Zukunftshaus-Wolkersdorf“ der gemeinnützigen Bau-, Wohnungs- und Siedlungsgenossenschaft Alpenland ist geplant, das prognosebasierte Regelungskonzept auf alle 8 Wohneinheiten anzuwenden. Jede Wohneinheit wird über einen eigenen Regler verfügen und die Nutzer/Nutzerinnen können ihre individuelle Komforttemperatur in der Wohnung wählen.

Das Volkshilfehaus in der Heiligenstädter Straße 172 ist ein gemischt genutztes Gebäude, das unterschiedliche Nutzungen und Nutzergruppen vereint und als sozialer Katalysator im Stadtteil dienen soll. Aufgrund der Kleinteiligkeit der Wohneinheiten wird das prognosebasierte Regelungskonzept in zwei Zonen ausgeführt: Die nach Osten ausgerichtete Gebäudehälfte vom Erdgeschoss bis zum Dachgeschoss wird als eine Einheit (Ostzone) und die nach Westen ausgerichtete Gebäudehälfte als eine Zone (Westzone) betrachtet. Beide Zonen werden separat betrachtet und erhalten jeweils eine Regeleinheit.

Das Demoviertel „Campo Breitenlee - living together“ befindet sich in der Podhagskygasse und Hausfeldstraße in 1220 Wien. Das Projekt befindet sich derzeit in der Planungsphase und besteht aus 7 Gebäuden mit einer Bruttogeschossfläche von ca. 30.652 m<sup>2</sup>. Im Zuge des Forschungsprojektes „ZQ3Demo - Umsetzung von urbanen Zukunftsquartieren mit Akteursvernetzung und rechtlich-ökonomisch replizierbaren Lösungen“ werden 15 ausgewählte Wohneinheiten mit dem prognosebasierten Regelungskonzept ausgestattet und detailliert überwacht. Vier weitere Wohneinheiten werden

als Referenzwohnungen ebenfalls mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, aber mit dem für das restliche Gebäude vorgesehenen Steuerungssystem betrieben.

In diesen laufenden Projekten sollen Erweiterungen des MPC-Konzepts wie oben beschrieben in der Praxis getestet werden. So soll beispielsweise ermittelt werden, wie sich die Temperaturflexibilität auf den Betrieb des MPC auswirkt und ob und in welchem Umfang mit dieser Regelung Energie- und Kosteneinsparungen möglich sind.

## LITERATUR

- Bentsman, J. (2022). Signals, Instrumentation, Control, And Machine Learning: An Integrative Introduction. World Scientific Publishing Company Pte Limited.
- BMK (2023). Die österreichische Klimaschutzstrategie/Politik, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Von [https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen\\_wohnen\\_und\\_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000310.html](https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000310.html) abgerufen
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. (2019). Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich.
- DIN. (2005). DIN.de. Von <https://www.din.de/de/meta/suche/62730!search?query=DIN+EN+ISO+7730> abgerufen
- Henning M. (2011). Temperaturmessung. Berlin: Springer.
- Quaschnig V. (2011). Regenerative Energiesysteme. München: Hanser Verlag.



# Sani60ies – Fassadenintegrierte Bauteilaktivierung im Bestandsbau

T. Keller, M. Wolf, B. Kling, T. Pröll

*Universität für Bodenkultur Wien, Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik, Institut für Verfahrens- und Energietechnik*

## ABSTRACT

The energy transition can only succeed with a heating transition. In Austria, the building sector is responsible for 16.2% of total greenhouse gas emissions (Umweltbundesamt 2021) or about a quarter of final energy consumption (European Commission 2021). The complete phase-out of fossil fuels for space heating is to be achieved by 2040. In the heat supply sector, the numerous households heated with gas - over 400,000 in Vienna alone - pose a particular challenge.

In urban areas, district heating or heat pump applications are particularly suitable as alternative systems for heat supply. To ensure efficient operation of heat pumps, the installation of low-temperature systems, such as wall or floor heating, is necessary. Low-temperature systems increase the efficiency of heat pumps and allow the diverse use of different heat sources.

The “Sani60ies” project develops and demonstrates a minimally invasive and socially acceptable approach. By thermally activating the façade of the exterior wall, the benefits of building component activation can be implemented in existing buildings without having to grossly interfere with the tenants’ living space. In the course of the project, the concept will be implemented and tested in three demonstration properties. The objects are common multi-party buildings from the 1950s and 1960s, respectively, and thus represent classic examples of buildings that are still supplied with fossil energy and are awaiting renovation.

An obvious issue with this approach is that the building component activation happens close to the surface of the building envelope. Thus some of the heat is inevitably lost to the environment. In order to assess the efficiency of the system, these losses were quantified at the beginning of the project (in three steps): Values from the literature, calculations based on simple approaches from thermodynamics and finally modeling, using a program for thermal bridge calculation.

In this paper, the methodology and selected results of the heat flows occurring for objects treated in the project are presented.

## 1 EINLEITUNG

Die Energiewende kann nur mit einer Wärmewende gelingen. Der Gebäudebereich ist in Österreich für 16,2 % der gesamten Treibhausgasemissionen (Umweltbundesamt 2021) bzw. etwa ein Viertel des Endenergieverbrauchs (Europäische Kommission 2021) verantwortlich. Bis 2040 soll der vollständige Ausstieg aus fossilen Energieträgern zur Raumheizung erreicht werden. In der Wärmeversorgung bilden dabei insbesondere die zahlreichen mit Gas beheizten Haushalte, allein in Wien über 400.000, eine besondere Herausforderung.

Als alternative Systeme zur Wärmebereitstellung bieten sich im städtischen Gebiet besonders Fernwärme- oder Wärmepumpenanwendungen an. Um einen effizienten Betrieb von Wärmepumpen zu gewährleisten, ist die Installation von Niedertemperatursystemen, wie Wand- oder Fußbodenheizungen, nötig. Niedertemperatursysteme heben die Effizienz von Wärmepumpen und erlauben die vielfältige Nutzung verschiedener Wärmequellen.

Das Projekt „Sani60ies“ entwickelt und demonstriert einen minimal invasiven und sozial verträglichen Lösungsansatz. Indem die Fassade der Außenwand thermisch aktiviert wird, können die Vorteile

der Bauteilaktivierung im Bestandsbau umgesetzt werden, ohne grob in den Wohnraum der Mieter eingreifen zu müssen. Im Zuge des Projektes wird an drei Demonstrationsobjekten das Konzept umgesetzt und erprobt. Die Objekte sind übliche Mehrparteiengebäude aus den 50er bzw. 60er-Jahren und stellen damit klassische Beispiele für Gebäude dar, die bis dato noch mit fossiler Energie versorgt werden und denen eine Sanierung bevorsteht.

Seit in Kirchlegern 1974 die Firma Ottensmeier Ingenieure GmbH mithilfe einer Holzrahmenkonstruktion die Heizungsrohre an der Außenwand anbrachte und den Hohlraum mit Einblasdämmstoff dämmte (Kühl 2018), wurde seither die Anwendbarkeit von Niedrigtemperatur- und Fassadensystemen u. A. mittels Simulation in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht (Schmidt et al. 2017; Zhu et al. 2019; Xie et al. 2012; Xu et al. 2010) und auch praktisch erprobt und angewandt (Groß & Schmidt 2020; Hinterseer 2019).

## 2 ANALYSE DES WÄRMEDURCHGANGS DER BESTANDSWAND

Ein offensichtliches Thema bei diesem Ansatz ist, dass die Bauteilaktivierung oberflächennah an der Hülle des Gebäudes passiert. Ein Teil der Wärme geht also unweigerlich an die Umwelt verloren. Um die Effizienz des Systems beurteilen zu können, wurden diese Verluste zu Beginn des Projekts (in drei Schritten) quantifiziert.

Im ersten Schritt wurden Werte aus der Literatur recherchiert. Darauf aufbauend wurden einfache Berechnungen des Wärmedurchgangs durchgeführt. Außerdem wurde mit dem Programm Therm (eine Software zur Wärmebrückenberechnung) die Temperaturverteilung und der Wärmedurchgang berechnet (siehe Abschnitt 2.2).

Die Berechnungen wurden für den Heiz- und Kühlfall für verschiedene Varianten durchgeführt. Ein Augenmerk lag dabei auf dem Einfluss der Vorlauftemperatur und des Rohrabstands auf die Wärmeströme. Außerdem wurden die Auswirkungen verschiedener Verlege-Varianten verglichen.

### 2.1 THEORETISCHE BETRACHTUNG DES WÄRMEDURCHGANGS

Symbole:

a...	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
λ...	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
d...	Schichtdicke	m
q...	Spezifischer (flächenbezogener) Wärmestrom	W/m <sup>2</sup>
U...	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
R...	Wärmedurchgangswiderstand	m <sup>2</sup> K/W
T...	Temperatur	°C

Kürzel:

VL...	Vorlauf
aWT...	Außenliegende Wandtemperierung
w...	Wasser
K...	Kern (Kerntemperatur der aktivierten Fassadenschicht)

Für die einfache Betrachtung wird von einem Wärmestrom durch eine ebene Wand mit mehreren Schichten ausgegangen, basierend auf der Formel:

$$q = U * (T_1 - T_2) \quad (1)$$

wobei der Kehrwert des Wärmedurchgangskoeffizienten U auch als Widerstand ausgedrückt werden kann und über den Wandaufbau wie folgt berechnet wird:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{innen}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \dots + \frac{1}{\alpha_{außen}} \quad (2)$$

Tab. 1 zeigt die Werte für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für die Bestandswand im ersten Demoobjekt in der Große Neugasse 25, 1040 Wien.

Tab. 1: Wandaufbau Große Neugasse 25, Werte aus dem Energieausweis

	Schichtdicke d in m	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W/(mK)	Wärmeübergangskoeffizient a in W/(m <sup>2</sup> K)
$\alpha_{innen}$			7.69
Putz	0.02	0.8	
Durisol	0.25	0.3	
Putz	0.02	0.8	
$\alpha_{außen}$			25

**U-Wert Gesamt 0.95 W/(m<sup>2</sup>K)**

Die Aktivierung der Fassade erfolgt über die äußere Putzschicht, indem die in der Fassade verlegten Rohre mit einer von der Außentemperatur abhängigen Vorlauftemperatur durchströmt werden. In der angestellten Betrachtung des Wärmedurchgangs teilt sich der Wärmestrom nach außen (über die Wärmedämmung) und nach innen (über die Bestandswand) auf, mit dem jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten (respektive Widerstand) und Temperaturniveau. (siehe Abb. 1)

Wärmestrom nach innen:

$$q_1 = \frac{1}{R_1} * (T_{VL} - T_1(innen)) \quad (3)$$

Wärmestrom nach außen:

$$q_2 = \frac{1}{R_2} * (T_{VL} - T_2(außen)) \quad (4)$$

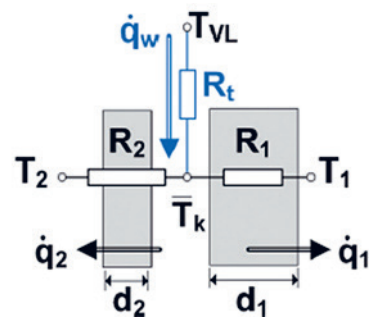


Abb. 1: Schematische Darstellung des Wärmestrom-Problems, Schmidt et al. (2017)

Schmidt et al. (2017) beschreiben den Wirkungsgrad in Prozent, wohingegen bei Groß & Schmidt (2020) der spezifische Nutzwärmestrom in Abhängigkeit vom U-Wert der Bestandswand und der Vorlauftemperatur bzw. der mittleren Temperatur der thermischen Aktivierung betrachtet wird.

Für den Wirkungsgrad in Prozent betrachten Schmidt et al. (2017) nur die Wärmeübergangswiderstände.

$$\eta_{aWT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

Je besser die Leitfähigkeit der Bestandswand und je dicker die Wärmedämmung, desto höher die Effizienz. Über die tatsächlichen Wärmeströme kann aus dieser Betrachtung noch keine Aussage getroffen werden, weil diese auch von den Temperaturen abhängig sind. So könnte die nach Formel 5 berechnete Effizienz zwar bei über 80 Prozent liegen, aber der Wärmestrom nach außen dennoch größer sein als der Wärmestrom nach innen, je nach Vorlauftemperatur der Bauteilaktivierung und Innenraum- bzw. Außentemperatur. Diese Betrachtungsweise beinhaltet den neutralisierten Wärmeverluststrom, der sich ohne Fassadenaktivierung einstellen würde, auch als Nutzen. (Schmidt et al. 2017)

Für niedrigere Temperaturen der Aktivierung zur Neutralisierung von Wärmeverlusten mag das geeignet sein. Für das betrachtete Demoobjekt jedoch soll über die Fassade aktiv Wärme in das Gebäude einbracht werden, weshalb auch die tatsächlichen Wärmeströme zu betrachten sind.

Für den spezifischen Nutzwärmestrom berechneten Groß & Schmidt (2020) den Wärmestrom nach innen anhand von Annahmen für die Vorlauftemperatur und die Innenraumtemperatur in Anlehnung an die Berechnungsnorm für Fußbodenheizungen und vergleicht die Ergebnisse mit Messwerten eines Testaufbaus einer Fassadenheizung.

Für einen U-Wert der Bestandswand von  $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und einer mittleren Temperatur der aktivierten Fassade erhielten Schmidt et al. (2017) einen Nutzwärmestrom von  $9.9 \text{ W}/\text{m}^2$ . Eine simple Wärmedurchgangsberechnung für den Wandaufbau in der Große Neugasse ergibt ein ähnliches Ergebnis. (siehe Tab. 2)

Tab. 2: Wärmedurchgangsberechnung für den Nutzwärmestrom für den Wandaufbau Große Neugasse 25

	Temperatur T in °C	Schichtdicke d in m	Wärmeleitfähigkeit $\Lambda$ in $\text{W}/(\text{mK})$	Wärmeübergangskoeffizient a in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$T_{\text{aktiv}}$	30			
Durisol		0.25	0.83	
Putz		0.02	0.8	
$a_{\text{innen}}$				7.69
$T_{\text{Innen}}$	20			

**Nutzwärmestrom  $9.8 \text{ W}/\text{m}^2$**

Analog dazu kann der Verlustwärmestrom nach außen berechnet werden. Es wird dazu eine Außentemperatur von  $0^\circ \text{C}$  angenommen (siehe Tab. 3). Das Rohr wird außerdem teilweise von der äußeren Putzschicht bedeckt, weshalb diese auch in den Schichten berücksichtigt wird.

Tab. 3: Wärmedurchgangsberechnung für den Verlustwärmestrom für den Wandaufbau Große Neugasse 25

	Temperatur T in °C	Schichtdicke d in m	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in W/(mK)	Wärmeübergangskoeffizient a in W/(m <sup>2</sup> K)
T <sub>aktiv</sub>	30			
Putz		0.014	0.8	
Dämmung		0.16	0.04	
a <sub>außen</sub>				25
T <sub>außen</sub>	0			

**Verlustwärmestrom 7.4 W/m<sup>2</sup>**

## 2.2 BETRACHTUNG DES WÄRMEÜBERGANGS MITTELS THERM

Anders als bei Groß et al. (2020), wo viele kleine Rohre mit sehr geringem Abstand zur Aktivierung verbaut wurden, werden bei der Vorgehensweise im Projekt „Sani60ies“ etwas größere Rohrdurchmesser (20x2 mm) mit größerem Abstand (30 cm) verlegt. Um auch diesen Einfluss zu evaluieren, wurden zusätzliche Berechnungen mit Therm durchgeführt.

Therm ist ein Programm zur Wärmebrückenberechnung. Im Forschungsprojekt wurde es verwendet, um den Wandaufbau vereinfacht abzubilden und so Wärmeströme nach innen und außen sowie Temperaturprofile für verschiedene Szenarien zu ermitteln. Abb. 2 zeigt exemplarisch den vereinfachten Wandaufbau für die Große Neugasse und ein Temperaturprofil.

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse der Wärmestromanalyse in Therm. Die drei dunklen, durchgezogenen Linien zeigen die Wärmeströme nach innen bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen. Die drei helleren Linien zeigen die dazugehörigen Ströme nach außen. Es zeigt sich deutlich die Zunahme des Wärmeflusses mit steigender Vorlauftemperatur und kürzeren Rohrabständen, wobei der Verlustwärmestrom mit zunehmender Vorlauftemperatur weniger stark ansteigt als der Nutzwärmestrom. Zurückzuführen ist das auf die Temperaturdifferenz, die relativ gesehen zur Innentemperatur (20 °C) stärker zunimmt als zur Außentemperatur (0 °C).

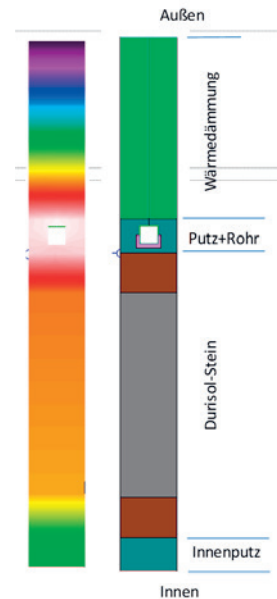


Abb. 2: Nachbildung des Wandaufbaus in Therm, links: Temperaturprofil, rechts: Schichten und Materialien

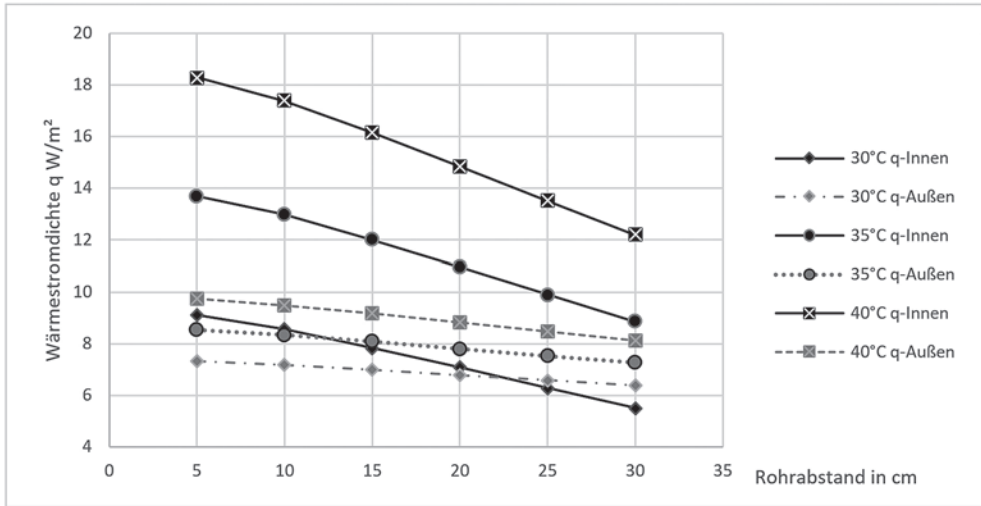


Abb. 3: Heizfall: Wärmestromdichte nach innen und außen bei unterschiedlichen Rohrtemperaturen u. Rohrabständen, Durisolwand, Gr. Neugasse, U-Wert der Bestandswand  $0.95 W/(m^2K)$ , Temperaturen: Innen  $20\text{ }^\circ\text{C}$  / Außen  $0\text{ }^\circ\text{C}$

### 3 VARIANTEN DER FASSADENAKTIVIERUNG

Für die thermische Aktivierung der Fassade gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Projekt „Sani60ies“ wurde das erste Demoobjekt (Große Neugasse 25) so verwirklicht, dass die Fassade auf Rohrdurchmesser eingeschlitzt, die Rohre in die Schlitzte eingebracht und abschließend verspachtelt wurden. Aus technischen/mechanischen Gründen ist das tiefe Schlitzten des Durisol-Steins kaum möglich, um die Rohre tiefer in der Wand zu versenken. Bei einer Ziegelwand hingegen ist das durchaus denkbar.

Die Rohre zur thermischen Aktivierung der Fassade können auf verschiedene Weisen in die Wand gebracht werden. Für das zweite Demoobjekt, bei dem die Bestandswand aus Ziegeln besteht, wurden in Therm drei Varianten theoretisch verglichen:

- Fräsen (siehe Abb. 4)
- Tieffräsen
- Nassputz



Abb. 4: Gefräste Fassade (Große Neugasse) mit Rohren und Befestigung

Beim einfachen Fräsen wird nur die Putzschicht der äußeren Fassade gefräst, so geschehen im ersten Demoobjekt. Tieffräsen hingegen würde bedeuten, tiefer als nur die Putzschicht zu fräsen, was bei Wänden aus Durisol aus mechanischen Gründen nicht empfehlenswert, bei Ziegelwänden hingegen grundsätzlich möglich ist. Eine dritte Variante, hier genannt Nassputz, sieht vor, die Rohre in einer zusätzlich aufgetragenen (thermisch gut leitenden) Putzschicht zu befestigen, so wie es im Tunnelbau durchaus üblich ist.

In Therm wurden die Auswirkungen der jeweiligen Varianten auf den Wärmestrom nach innen (Nutzwärmestrom) und außen (Verlustwärmestrom) betrachtet. Dabei wurde außerdem verglichen,

welchen Einfluss es auf die Wärmeströme hat, wenn die bestehende Außenputzschicht aus Thermoputz besteht.

Abb. 5 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für den Kühlfall. Relevant für den Gesamtwärmestrom nach innen ist das Temperaturprofil in der aktivierten Schicht. Je besser die Wärmeleitung in der aktivierten Schicht zwischen den Rohren ist, desto größer ist der Wärmeeintrag nach innen. Aus diesem Grund schneidet die Variante Nassputz auch am besten ab: Die zusätzliche Schicht fördert die Temperaturverteilung innerhalb der aktivierten Schicht. Für Wände mit Thermoputz empfiehlt sich Tieffräsen. Hier kann sich beim Fräsen und bei der Nassputz-Variante das Temperaturprofil in der aktivierten Schicht schlechter ausbilden.

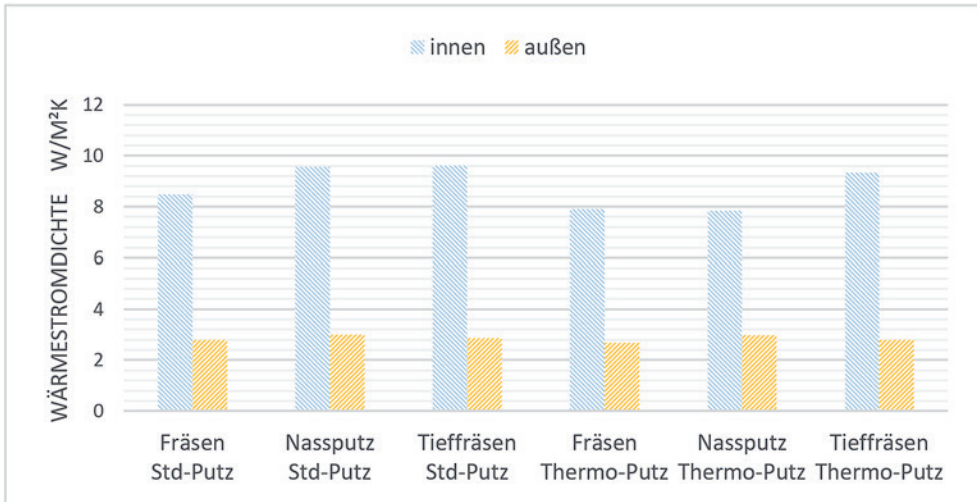


Abb. 5: Kühlfall: Wärmestromdichte  $W/(m^2K)$  nach innen/außen, Bestandswand aus Ziegel mit  $U$ -Wert  $1.38 W/(m^2K)$ ,  $140\text{mm}$  Dämmstärke, Temperaturen: Innen  $26^\circ\text{C}$ , Außen  $30^\circ\text{C}$ , Vorlauftemperatur  $18^\circ\text{C}$ , Rohrabstand  $20\text{cm}$

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Um für die thermische Fassadenaktivierung die Wärmeströme nach innen und außen zu quantifizieren wurden Literaturwerte, einfache Berechnungen und Wärmestrommodellierung miteinander verglichen und plausible Übereinstimmung festgestellt. Die Ergebnisse zeigen, wie zu vermuten war, je größer der Rohrabstand wird, desto geringer werden die Wärmeströme (der Nutzwärmestrom nimmt bei einem Rohrabstand von  $30\text{ cm}$  um ca.  $1/3$  ab). Grund dafür ist die niedrigere Temperatur in der aktivierten Schicht, je weiter das Rohr entfernt liegt. Außerdem zeigt sich, dass sich höhere Vorlauftemperaturen positiv auf das Verhältnis von Nutzen zu Verlust auswirken. Grund dafür ist, dass das Temperaturverhältnis zum Innenraum verhältnismäßig stärker ansteigt als jenes zur Außentemperatur.

Außerdem wurde die Auswirkungen auf den Wärmestrom bei verschiedenen Varianten der Aktivierung verglichen (Fräsen, Tieffräsen und Nassputz) bei normalem bzw. thermisch isolierendem Putz. Tieffräsen ist, unter dem Aspekt des Wärmedurchgangs betrachtet, zu bevorzugen, jedoch nicht immer gut umsetzbar. Bei der Variante Tieffräsen müssen jedenfalls die Statik der Bestandswand sowie die mechanische Belastbarkeit berücksichtigt werden.

## LITERATUR

- Umweltbundesamt (2021) Klimaschutzbericht 2021. Wien
- Europäische Kommission (2021) *EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2021*. Brüssel
- Groß B., Schmidt C.W. (2020) *LEXU II – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung: Schlussbericht, Saarbrücken*
- Hinterseer S. (2019) Smart Skin - Salzburger Multifunktionsfassade: Ergebnisbericht. Salzburg
- Kühl A. (2018) So wird die Fassade zu einem Teil der Haustechnik, In *energynet.de*, <https://www.energynet.de/2018/09/13/fassade-haustechnik/> (zugriff 26.4.2023)
- Schmidt C.W., Luther G., Altgeld H., Maas S., Groß B., Scholzen F (2017) Außenliegende Wandtemperierung - LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandwand: theoretische Grundlagen und Kennwerte. *Bauphysik*, 39(4), pp. 215–223. doi:10.1002/bapi.201710028.
- Xie J.-L., Zhu Q.-Y. & Xu X.-H. (2012) An active pipe-embedded building envelope for utilizing low-grade energy sources. In *Journal of Central South University*, 19, 1663-1667.
- Xu X., Wang S., Wang J. & Xiao F. (2010) Active pipe-embedded structures in buildings for utilizing low-grade energy sources: A review. In *Energy and Buildings*, 42, 1567-1581.
- Zhu L., Yang Y., Chen S. & Sun Y. (2019) Thermal performances study on a façade-built-in two-phase thermosyphon loop for passive thermo-activated building system. In *Energy Conversion and Management*, 199, 112059.

# Thermische Bauteilaktivierung und elektrische Speicher in Solar Energie Gebäuden

M. Gumhalter, T. Ramschak  
*AEE INTEC, Gleisdorf, Austria*

## ABSTRACT:

The electrification of the building sector and the volatile renewable energy generation pose increasing challenges to the power grids. Solar energy buildings with high solar coverage are an important measure, but are often evaluated only based on energy performance indicators. Peak loads in consumption and generation, which could be mitigated by thermal masses or electrical storage, are rarely considered. This paper investigates the system integration of solar generation technologies and flexibility measures using an example building. The mean daily shifted thermal energy is introduced as an evaluation metric. A dynamic building and system simulation enables the analysis of scenarios with varying system configurations. Proactive management of thermally activated building masses through active demand response can increase system performance in terms of solar load cover factor, achieving quantitatively similar results as battery storage without additional investment costs. Although the simultaneous use of active load shifting with thermal building mass activation and a battery storage system results in mutual influence, it is necessary to achieve solar coverage levels of over 80%.

## 1 MOTIVATION

Die zunehmende Elektrifizierung des Gebäudebereichs, sowie die wachsende volatile erneuerbare Energieerzeugung stellen eine enorme Herausforderung für die elektrischen Übertragungs- und Verteilungsnetze dar. Gebäude mit hohen Anteilen an solar erzeugter Wärme, Kälte und solar erzeugtem Haushaltsstrom sind ein wichtiger Schritt, um klimapolitische Ziele zu erreichen. Diese Gebäude und die verwendeten Systeme werden jedoch oft nur anhand energetischer Kennzahlen, wie dem spezifischen Heizenergiebedarf, der jährlichen Energiebilanz oder dem solaren Eigennutzungsgrad evaluiert und ausgelegt, was nicht zwangsläufig zu geringeren Spitzenleistungen oder einer Entlastung des Stromnetzes führt. Sowohl Verbrauchsspitzen während der Heizperiode als auch Erzeugungsspitzen während der Sommermonate können nicht nur durch elektrische Speicher, sondern auch durch den gezielten Einsatz von thermischen Massen gedämpft werden. Der breite Einsatz von Gebäudemassen als thermische Speicher setzt allerdings die Evaluierung der erschließbaren Kapazitäten voraus, was in dieser Arbeit für ein Beispielgebäude durchgeführt wird.

## 2 ZIELE

Auf Basis eines virtuellen Beispielgebäudes welches im Internationalen Forschungsprojekt Sol4City (<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/sol4city.php>) definiert wurde, wird die Systemintegration von solaren Erzeugungstechnologien und Speichern untersucht. Dabei lassen sich die Energieströme innerhalb des Systems bestimmen, z.B. die Energieflüsse zwischen PVT, Bauteilmassen, Heizung, Kühlung und Batteriesystemen. Als wichtiger Kennwert bei der Bewertung der Effektivität von Batteriespeichern und Bauteilaktivierung wird die mittlere täglich gespeicherte Energie eingeführt, welche angibt, wie viel Energie im Durchschnitt pro Tag in einem Speicher gespeichert wird oder wie viel Energie zeitlich verschoben wird. Eine Darstellung dieser Ergebnisse für Batterie und aktiv

genutzte Bauteilaktivierung im Vergleich zu einem Referenzszenario, kann dabei helfen, die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ansätze besser zu verstehen und eine fundierte Entscheidung zu treffen.

### 3 METHODIK

Durch die Anwendung einer dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation können unterschiedliche Szenarien zur Energieversorgung eines Referenzgebäudes umfassend analysiert werden. Hierbei werden Jahreslastprofile für den Warmwasserbedarf sowie den elektrischen Haushaltsstrombedarf in hoher zeitlicher Auflösung berücksichtigt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die bestehenden Randbedingungen, die verschiedenen Optionen sowie die Bewertungskriterien detailliert beschrieben.

#### 3.1 REFERENZGEBÄUDE

Im Rahmen des Sol4City Projekts wurden zunächst die Rahmenbedingungen für österreichische Wohngebäude untersucht und quantifiziert. Daraufhin wurde ein repräsentatives Gebäude für den Neubau nach Vorgaben des Passivhaus Instituts definiert und charakterisiert, dessen detaillierte Beschreibung in Gumhalter & Ramschak (2022) zu finden ist. Die Wärme- und Warmwasserversorgung des Gebäudes erfolgt mithilfe einer Wärmepumpe mit Erdsonden, wobei Solarumwandlungstechnologien wie PV- und abgedeckte PVT-Kollektoren die erneuerbare Wärmeversorgung unterstützen und teilweise den Haushaltsstrombedarf decken. Zur Wärme- und Kälteabgabe wird in den Decken eine Bauteilaktivierung mit einer Verlegetiefe von 5 cm eingesetzt, wodurch eine aktive Nutzung der thermischen Gebäudemasse ermöglicht wird. Der Standort des Gebäudes ist Graz, und die klimatischen Rahmenbedingungen für die dynamischen Anlagen- und Gebäudesimulationen werden einem ASHRAE Referenzklimadatensatz für den Standort Graz-Thalerhof entnommen. Das Referenzgebäude wurde mithilfe des dynamischen Simulationsprogramms IDA ICE (<https://www.equa.se/de/ida-ice>) modelliert. Eine Simulationsstudie wurde durchgeführt, um den Heizwärme- bzw. Kühlbedarf des Gebäudes zu ermitteln. Der standortspezifische Heiz- und Kühlbedarf bezogen auf die Nettogeschoßfläche (NGF) sowie weitere Gebäude-Kennzahlen sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Energetische Kennwerte des Sol4City Beispielgebäudes (nach Gumhalter & Ramschak 2022)

Parameter	Einheit	Wert
Heizwärmebedarf HWB	kWh/(m <sup>2</sup> a)	22,3
Kältebedarf KB	kWh/(m <sup>2</sup> a)	7,4
Bruttogeschoßfläche BGF	m <sup>2</sup>	842,4
U-Wert Gebäudehülle im Durchschnitt	W/(m <sup>2</sup> K)	0,283
Warmwasserbedarf	l/Person und Tag @45°C	30
Personen		30

#### 3.2 SYSTEMVARIANTEN

Das Referenzsystem zur Bereitstellung der thermischen Energie für die Gebäudeheizung/Kühlung sowie für die Deckung des Warmwasserbedarfs besteht aus einer Wärmepumpe mit Geothermie Sonden und einem kombinierten PV/PVT Kollektorfeld. In Gumhalter & Ramschak (2022) stellte sich eine Aufteilung der vorhandenen Dachfläche auf 33 % PV und 66 % PVT als vorteilhaft für diesen Anwendungsfall heraus. Unter Berücksichtigung dieses Referenzsystems werden zwei Speichertechnologien untersucht, die eine Steigerung der solaren Deckungsgrade ermöglichen. Hierzu wird ein elektrisches Energiemanagement mittels Batterie und die aktive Nutzung der thermischen Gebäudemasse durch ein Active Demand Response (ADR) System implementiert.

Eine genauere Beschreibung der Sol4City Systembausteine ist in Tab. 2 zusammengefasst. Die hier herangezogenen Systemvarianten sind ein Ausschnitt aus den in Gumhalter & Ramschak (2023) betrachteten Varianten und bedienen sich an Kombinationen der in Tab. 2 beschriebenen Technologien. In Tab. 3 sind die verschiedenen Konfigurationen aufgelistet.

### 3.3 BEWERTUNGSKRITERIEN

Die Auswahl und Definition der hier verwendeten Indikatoren für Load Match und Flexibility basieren auf Farulla et al. (2021). Die gewählten Indikatoren werden außerdem für die einzelnen Verbraucher im Energiesystem gesondert berechnet.

#### Load Match Indikatoren

Die Definition des Load Cover Factor (LCF) für die Verbraucher sind in Gleichung 1 bis 4 beschrieben. Diese Kennzahl repräsentiert den prozentualen Anteil des elektrischen Strombedarfs, der über lokal erzeugte erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Der LCF hängt sowohl vom Verhältnis der solaren Energiebereitstellung zum Energiebedarf als auch von der Möglichkeit der Lastverschiebung und der Möglichkeit

Tab. 2: Kurzbeschreibung der relevanten Systemkomponenten auf Basis der detaillierteren Systembeschreibung in (Gumhalter & Ramschak 2022)

Bezeichnung	Technologie	Beschreibung
WP	Geothermie Wärmepumpe	Sole-Wasser-Wärmepumpensystem mit Tiefenbohrung als Wärmequelle und einer thermischen Auslegungsleistung von 10kW. Kühlung erfolgt über Free Cooling mit den Erdsonden.
PV + PVT	Photovoltaik in Kombination mit PVT	49,6 m <sup>2</sup> (8,1 kWp) PV-Module; 99,1 m <sup>2</sup> (16,2 kWp) abgedeckte PVT-Module, Neigungswinkel 51°, Ausrichtung Süd. Thermischer Anschluss der PVT-Module über einen Wärmetauscher am Speicher
ADR	Active Demand Response Regelung	Diese Regelungsstrategie verursacht ein Überheizen der Bauteilmasse (um max. 2 K) und des Wasserspeichers (um max. 10K) zu Zeiten an denen typischerweise Strom ins Netz zurückgespeist werden würde. Die damit gespeicherte Energie kann somit in Zeiten ohne solare Erzeugung ins Gebäude abgegeben werden. Ausgelöst wird das Signal durch Überschreiten eines Schwellwertes bei der elektrischen Erzeugungsleistung.
BAT	Batteriespeichersystem	Ein Batteriespeicher mit 20 kWh netto Kapazität speichert überschüssige elektrische Energie aus PV und PVT. Die gespeicherte Energie wird in Zeiten ohne erneuerbare Erzeugung genutzt.

Tab. 3: Systemkonfiguration der betrachteten Varianten

Systemkonfiguration	WP	PV33% + PVT66%	ADR	BAT
WP + PV + PVT	✓	✓		
WP + PV + PVT + ADR	✓	✓	✓	
WP + PV + PVT + BAT	✓	✓		✓
WP + PV + PVT + ADR + BAT	✓	✓	✓	✓

zur Energiespeicherung ab. Dabei ist anzumerken, dass elektrische Energie aus PV(T) und Batteriespeicher in der weiteren Betrachtung zuerst zur Deckung der Wärmebereitstellung für Heizung und Warmwasser, dann für das Kühlen und der Rest für den Haushaltsstromverbrauch genutzt wird.

$$LCF_{total} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[g_{tot}(t), l_{tot}(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l_{tot}(t) dt} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$LCF_h = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[g_{tot}(t), l_H(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l_H(t) dt} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$LCF_c = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[\max[0, g_{tot}(t) - l_H(t)], l_c(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l_c(t) dt} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$LCF_{hh} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[\max[0, g_{tot}(t) - l_H(t) - l_c(t)], l_{El}(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l_{El}(t) dt} \quad (\text{Gl. 4})$$

### Flexibility Indikatoren

Die aktive nutzbare Speicherkapazität der Gebäudemasse  $C_{ADR,h}$  (Gl. 5) stellt die Menge der zusätzlich gespeicherten Wärmeenergie während eines aktiven ADR-Signals im Vergleich zum Referenzszenario (ohne ADR) über die Dauer  $t_{ADR}$  dar. Dabei ist  $\dot{Q}_h$  der vom Wärmeversorgungssystem bereitgestellte Wärmestrom für die Bauteilaktivierung. Analog dazu beschreibt  $C_{ADR,el}$  (Gl. 6) die zusätzliche elektrische Energie welche im Betrachtungszeitraum durch ein ADR-Signal zur Wärmebereitstellung aufgenommen wird.

$$C_{ADR,h} = \int_0^{t_{ADR}} (\dot{Q}_{h,ADR} - \dot{Q}_{h,ref}) dt \quad (\text{Gl. 5})$$

$$C_{ADR,el} = \int_0^{t_{ADR}} (l_{h,ADR} - l_{h,ref}) dt \quad (\text{Gl. 6})$$

Gl. 7 beschreibt die Menge an elektrischer Energie, welche im Betrachtungszeitraum aus der Batterie entnommen und zur Wärmebereitstellung verwendet wird. Um für die Batterie eine vergleichbare verschiebbare Wärmemenge zu erhalten, wird mit Gl. 8 die Wärmemenge bestimmt, welche ausschließlich durch die Nutzung von elektrischer Energie aus der Batterie erzeugt wird.

$$C_{Bat,el} = \int_0^t \min[g_{Bat}(t), (l_H(t) - \min[g_{PVT}(t), l_H(t)])] dt \quad (\text{Gl. 7})$$

$$C_{Bat,h} = \int_0^t (COP(t) \cdot \min[g_{Bat}(t), (l_H(t) - \min[g_{PVT}(t), l_H(t)])]) dt \quad (\text{Gl. 8})$$

Die oben definierten KPIs können methodisch analog für den Kühlfall definiert werden, was hier allerdings aufgrund des begrenzten Umfangs nicht ausgeführt wurde.

## 4 ERGEBNISSE

Die Möglichkeiten der einzelnen Speichertechnologien zur Erhöhung des solaren Deckungsgrades werden im Folgenden dargestellt und in einem zweiten Schritt auf ihre Speicherkapazitäten und Flexibilitätspotenziale untersucht.

### 4.1 ENERGETISCHE KENNZAHLEN

In der Basisvariante WP+PV+PVT ohne gezielte Speichernutzung kann das betrachtete Mehrfamilienhaus einen  $LCF_{total}$  von rund 42 % für den gesamten Strombedarf erreichen. Im Vergleich dazu, kann für die Systemvariante inklusive Lastverschiebung durch ADR-Signal und Batteriespeicher der  $LCF_{total}$  auf 62 % erhöht werden. Dabei werden über 85 % des elektrischen Strombedarf der Wärmepumpe für die Raumheizung und Warmwassererzeugung, 96 % des Strombedarfs für die Kühlung und rund 57 % des Haushaltsstrombedarfs lokal gedeckt. In Abb. 1 werden diese Zahlen, inklusive dem Stromverbrauch für Wärme und Kälte, für alle untersuchten Varianten grafisch dargestellt. Eine umfassendere Analyse der energetischen Kennzahlen zu diesem Beispiel und die Auswirkung auf das elektrische Netz kann in Gumhalter & Ramschak (2023) nachgeschlagen werden.

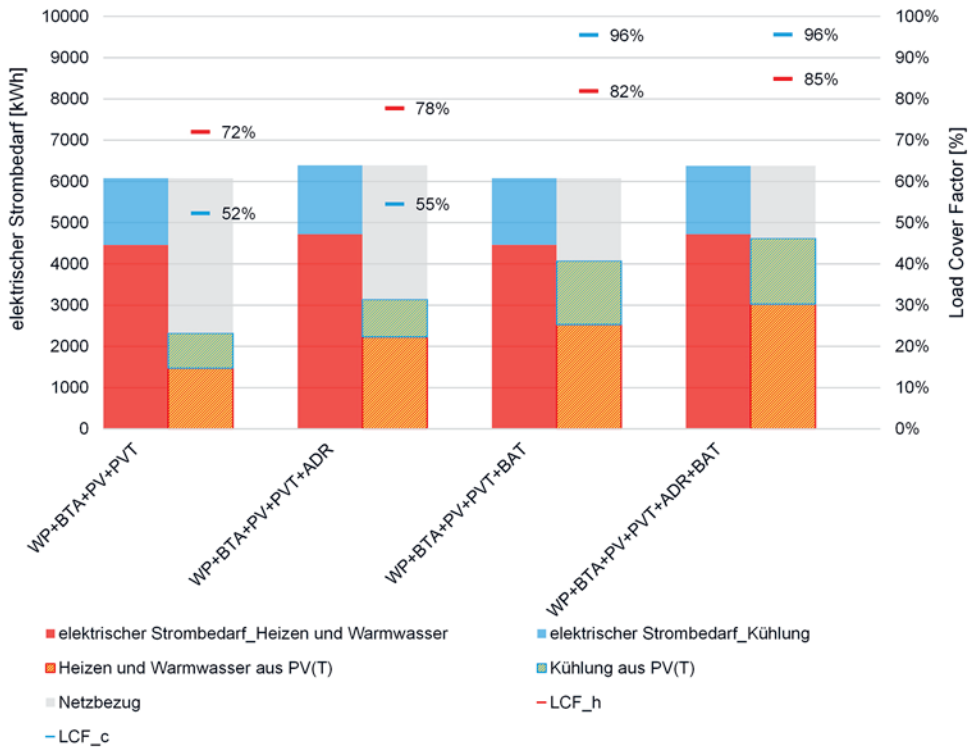


Abb. 1: Systemvergleich mit elektrischen Energieverbrauch, Anteilige Deckung durch erneuerbare Energie aus PV(T) und Load Cover Factor für die Systemvarianten im Demonstrationsgebäude.

Beispielhaft für das Szenario mit beiden Speichertechnologien stellt Abbildung 2 die Energieströme im System von links (Quellen) nach rechts (Verbraucher) dar. Die Datengrundlage dazu sind Jahresenergiesummen. Dass die Quelle Geothermie sowohl Wärme als auch Kälte bereitstellt liegt an der Saisonal unterschiedlichen Nutzung. Des Weiteren, ist erkennbar, dass das Gebäude Jahresbilanziell mehr Energie ins Stromnetz liefert als es bezieht und auch im Sommer mehr Wärme in die Geothermie Sonden speichert, als im Winter entnommen wird. In der Heizperiode wird der Großteil der bereitgestellten Raumwärme (ADR\_heizen) bei aktivem ADR-Signal in die Bauteile gespeichert, während die Wirkung in der Kühlsaison minimal ist. Dies liegt an der Auslegung der Kühlung bei der die Bauteile mit einer minimalen Vorlauftemperatur von 16 °C konditioniert werden, um die Kondensationsgefahr

an den Bauteiloberflächen zu reduzieren. Die geringe Temperaturdifferenz zum Raum limitiert die Kühlleistungen und dadurch das Potenzial zur zeitliche Lastverschiebung.

## 4.2 SPEICHERKAPAZITÄTEN

Bei der Untersuchung der genutzten Speicherkapazitäten wurde in diesem Rahmen ausschließlich die Heizsaison von 1. September bis 10. April berücksichtigt. Da die dynamischen Lastverschiebungsvorgänge täglich stark variieren, wurden die in Kapitel 3.3 definierten Kennzahlen im Durchschnitt für die gesamte Heizsaison (222 Tage) ermittelt. In Tab. 4 finden sich die berechneten Werte der aktiven Speicherkapazitäten für

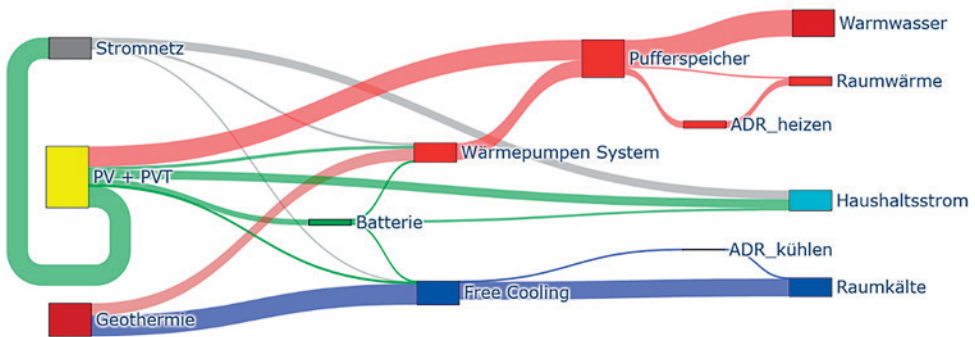


Abb. 2: Energieströme im System WP + PV + PVT + ADR + BAT. Dabei stellen die Farben der Verbindungen folgende Energieträger dar: Rot: Wärme, Blau: Kälte, Grün: Strom lokal erzeugt, Grau: Strom aus dem Netz

die untersuchten Systemvarianten. Es zeigt sich, dass gemessen an der täglich gespeicherten Wärmemenge die Lastverschiebung mittels ADR-Signals, dem Batteriesystem überlegen ist ( $C_{ADR,h}$  im Vergleich zu  $C_{Bat,h}$ ). Die dafür nötige gespeicherte und zeitlich verschobene elektrische Energie ist allerdings für den Batteriespeicher deutlich größer als für die Verwendung eines ADR-Signals. Dieses Verhalten lässt sich durch folgende Punkte erklären.

- Das ADR-Signal wirkt sich direkt auf den Wärmebedarf des Heizsystems aus und speichert in einer aktiven Lastverschiebungssituation neben der Wärme aus der Wärmepumpe auch eventuelle Erträge aus dem PVT-System in die Bauteile.
- Bei aktivem ADR-Signal ist die WP zumeist aktiv und erzeugt mit einem hohen COP die benötigte Niedertemperatur-Wärme für die Bauteilaktivierung.
- Wenn elektrische Energie aus der Batterie im Heizsystem verwendet wird, dann befindet sich dieses nicht unbedingt im aktiven Heizbetrieb. Somit werden oft Nebenverbraucher wie Pumpen und Lüftung bedient, was im Betrieb dazu führt, dass pro Stromeinheit aus der Batterie weniger Wärmeeinheiten produziert werden.

Tab. 4: Ergebnissammlung für die Flexibility Indikatoren nach Kapitel 3.3 im täglichen Durchschnitt für die Heizsaison

	$C_{ADR,el}$ kWh/d	$C_{ADR,h}$ kWh/d	$C_{Bat,el}$ kWh/d	$C_{Bat,h}$ kWh/d
WP + PV + PVT + ADR	3.51	8.66	-	-
WP + PV + PVT + BAT	-	-	4.76	7.99
WP + PV + PVT + ADR + BAT	3.48	8.71	3.63	4.87

## 5 CONCLUSIO

Durch Energiespeicherung in Gebäuden kann die Last von Spitzenzeiten um einige Stunden von der Nacht in den Tag verschoben werden, um beispielsweise erneuerbare vor-ort erzeugte Energie aus PV bzw. PVT besser zu nutzen oder das Stromnetz zu entlasten. Die entwickelten Methoden und Simulationsmodelle erlauben es, die Möglichkeiten und Grenzen der Lastverschiebung durch die Aktivierung der thermischen Masse und/oder durch thermische oder elektrische Speicher zu diskutieren. Eine proaktive Bewirtschaftung der thermisch aktivierten Bauteilmassen durch "externe" Signale (ADR) kann die Systemperformance in Bezug auf den LCF erhöhen. Dabei werden ohne zusätzliche Investitionskosten quantitativ ähnliche Ergebnisse erzielt als mit einem investitionsintensiven Batteriespeicher. Während die Lastverschiebung mittels ADR ausschließlich den Energieverbrauch der WP verschiebt, kann jedoch eine elektrische Batterie zusätzliche Verbraucher bedienen und damit vielseitiger eingesetzt werden. Bei einer Kombination aus Bauteilaktivierung mit ADR-Signal Steuerung und einem elektrischen Speicher, reduziert sich die mittlere aktiv genutzte Speicherkapazität des Batteriespeichers für die Wärmebereitstellung, während das  $C_{ADR,h}$  annähernd konstant bleibt. Die Untersuchungen zeigen, dass beide Systeme zu unterschiedlichen Zeiten und Betriebszuständen wirken und die gegenseitige Beeinflussung stärker auf das Verschiebungspotenzial der Batterie wirkt als auf die Lastverschiebung mittels Bauteilaktivierung. Beim parallelen Einsatz der beiden betrachteten Speichersysteme im Demonstrationsgebäude kann ein LCF für die Wärmebereitstellung von 85 % erreicht werden.

## DANKSAGUNG

Die Förderung zum Projekt Sol4City erfolgt durch das Bundesministerium für Klima-schutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Projektnummer FO999886948).

## LITERATUR

- Farulla G. A., Tumminia G., Sergi, F., Aloisio, D., Cellura M., Antonucci V., Ferraro, M. (2021) A Review of Key Performance Indicators for Building Flexibility Quantification to Support the Clean Energy Transition. *Energies*, Band <https://doi.org/10.3390/en14185676>.
- Gumhalter M. & Ramschak T. (2022) Technische Optimierung von PVT Anlagen durch innovative System- und Regelungsansätze. 32. *Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme*; ISBN 978-3-948176-17-4.
- Gumhalter M. & Ramschak T. (2023) Elektrisches Netzverhalten von Solar Energie Gebäuden - Lastmanagement und Netzentlastung. 33. *Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme*.

Kontaktdaten: Michael Gumhalter, AEE INTEC, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf  
Email: [m.gumhalter@aec.at](mailto:m.gumhalter@aec.at)



# Effiziente Booster/Basic-Wärmepumpen-Konzepte für die Sanierung

G. Zotter<sup>1)2)</sup>,

<sup>1)</sup> AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich

<sup>2)</sup> FH Joanneum, Kapfenberg, Österreich

**ABSTRACT:** To achieve climate-neutral cities in Austria, about 150 gas-fired boilers would have to be replaced every day. In addition to district heating, basic/booster heat pumps in combination with minimally invasive thermal refurbishment of old buildings in urban areas will therefore be necessary. The refurbishment lowers the heating energy demand and as a result, in the case of existing radiators, the necessary supply temperatures could also be reduced to about 45 °C. Air source heat pumps are still the easiest one to install and cost efficient, particular in urban regions. That is a reason that the efficient concepts have to be used, to avoid a high electricity consumption even on cold winter days. Basic/booster heat pumps with intermediate storage tanks are ideal for this minimally invasive refurbishment without the need to install new floor heating systems. Basic/booster heat pumps concepts could achieve annual performance factors that are over 25% higher compared to single-stage centralized ones. Particularly, with an intermediate storage tank, the higher outdoor air temperatures can be shifted from day to night and used with the booster heat pumps without the operation of the basic heat pumps. This is also supportive to avoid noise issues in the night from the air source fan. This work shows that particularly the choice of the right temperature level and spread of the intermediate heating circuit is important to reach high COPs. Likewise, the Basic heat pump must be well designed to allow high source extraction rates and thus high overall COPs. Thus, the basic/booster heat pumps concept, if correctly designed, represent an energetically sensible substitution technology for the gas boiler in the renovation.

## 1 EINLEITUNG

Die Beseitigung der Gas-(Etagen-)Therme (in weitererfolge Gas-Thermen genannt) stellt in urbanen Räumen die größte Hürde am Weg zur Klimaneutralität und für den Gas-ausstieg dar. Denn gemäß, Thermen sind das primäre Heizsystem der Stadt Wien (siehe Abb. 1). Laut der Wiener Zeitung (2021) heizten 442.287 Wiener Haushalte im Jahr 2020 mit Erdgas, das Gros davon mittels Gas-Thermen. Die Situation dürfte in anderen Städten, wie Graz etc. ähnlich gelagert sein. Gemäß Cerveny (2021) müssen bis 2040 ca. 150 Gas-Thermen pro Tag getauscht werden, um die beschlossenen Klimaziele zu erreichen. Mit dem Abhängen der Gas-Thermen ist es dabei nicht getan. Es bedarf einer CO<sub>2</sub>-freien Heizalternative und zusätzlich einem durchdachten thermischen Sanierungskonzept. Als Heizalternative werden dabei oft Wärmepumpen verfolgt, wobei es unterschiedliche Konzepte und Quellen gibt. Bis 2040 sollen 56 % des gesamten Wärmebedarfs z.B. der Stadt Wien mit Fernwärme gedeckt werden, der Rest im Wesentlichen mit Wärmepumpen (Cerveny 2021). Herausfordernd ist dabei aber das Heizungstemperaturniveau des Wohnhausbestandes, da es sich meist um Radiator-Heizsysteme handelt, die mit Vorlauftemperaturen von bis zu 80 °C arbeiten.

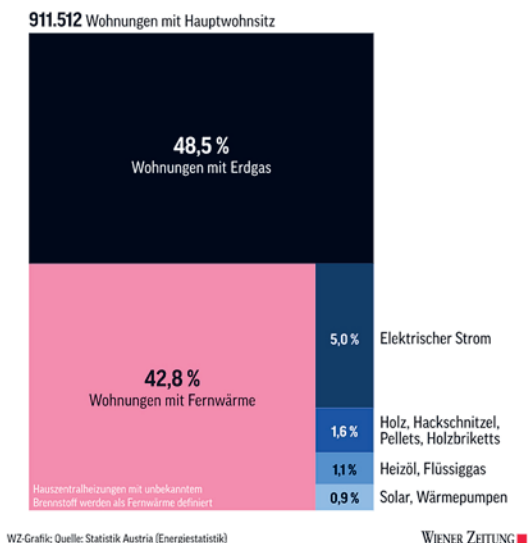


Abb. 1: Übersicht Heizsysteme in Wien (Wiener Zeitung 2021)

## 2 WÄRMEPUMPEN IN DER SANIERUNG

Ein besonders großes Potential für die Sanierung liegt bei Wohnhäusern aus den 60er- und 70er-Jahren, aber auch bei neueren (80er-Jahre) und teilsanierten Gebäuden. Neue Sanierungskonzepte müssen die thermisch-optimierte Hülle mit einer Wärmeversorgung auf Basis von Wärmepumpentechnologien und mit erneuerbaren Energien vereinen und ermöglichen eine Kernsanierung zu vermeiden. Obwohl seit vielen Jahren Lösungen für die Sanierung von mehrgeschößigen Bestandswohngebäuden existieren, stagniert die Sanierungsrate bei ca. 1 Prozent. Die Gründe liegen meist in der Vermeidung von notwendigen Umsiedelungen bzw. Leerständen von Bestandsgebäuden bei Kernsanierungen. Zur Steigerung der Sanierungsrate sind deshalb neue minimalinvasive und skalierbare serielle Sanierungsverfahren erforderlich. Diese können schnell vor Ort umgesetzt werden, ohne die BewohnerInnen zu beeinträchtigen. Der notwendige Ausstieg aus Gas wird den Druck auf den Sanierungsmarkt zudem deutlich erhöhen. (Zotter & Ochs 2022a).

Wärmepumpen, die fast ausschließlich erneuerbaren Energiequellen nutzen, eignen sich dafür technisch schon; wobei sich herkömmliche Lösungen im urbanen Raum aufgrund der ungünstigen Temperatursituation (bei Radiatoren-Heizungen), des Platzbedarfs, Erschließungs- und Schallgrenzen nur bedingt anbieten. Zusätzlich sind Gasetagenheizungen dezentrale Systeme, die nur eine Wohnung im Geschoßwohnbau heizen. Nahezu alle umweltschonenden Alternativen zur Therme, die heute zu Verfügung stehen, funktionieren zentral. Ein solcher Umstieg würde einen massiven Eingriff in die Substanz des Hauses bedeuten und gleicht eher einer Generalsanierung mit viel Kosten, Staub, Schutt und Schmutz, da einerseits eine Fußbodenheizung installiert und Rohrsysteme zur Erschließung im gesamten Haus verlegt werden müssten (Zotter & Ochs 2022b).

Bei der thermischen Sanierung würde aber ein Umstieg auf eine Fußbodenheizung i.d.R. einen zu hohen invasiven Eingriff in Bezug auf Kosten, Bauzeit, neue Einrichtung und vieles mehr bedeuten (Zotter & Ochs 2022c). Daher werden in dieser Arbeit ausschließlich Lösungen für Heizanlagen behandelt, die das bestehende Radiatorheizsystem beibehalten, da eine Kernsanierung, wie oben angeführt, keine schnelle und breitenwirksame Lösung sein wird. Hinsichtlich der Wärmequelle der Wärmepumpen in der Sanierung sind vor allem Luft-Wärmepumpen gefragt, da sie technisch und infrastrukturell

in urbanen Räumen tlw. einfacher zu installieren sind und hinsichtlich Investitionskosten Vorteile aufweisen. Folglich bezieht sich diese Arbeit auf Luft-Wärmepumpenkonzepte.

## 2.1 WÄREMPUMPEN EFFIZIENZ

Der Ausstieg aus der Nutzung von Gas-Thermen für Heizungen bedingt eine flächendeckende energetische Sanierung des Gebäudebestands (Zotter & Ochs 2022b), um die notwendigen Vor- und Rücklaufemperaturen ( $t_{VL}$  &  $t_{RL}$ ) zu senken und Luft-Wärmepumpen ökologisch und ökonomisch sinnvoll (auch an kalten Wintertagen) in Bestandsbauten einsetzen zu können.

Als Maß für einen effizienten Betrieb wird die Jahresarbeitszahl herangezogen. Der s.g. Coefficient of Performance (COP, siehe Gl. 1) ist das Verhältnis von Heizleistung ( $\dot{Q}_H$ ) zur aufgenommen elektr. Antriebsleistung ( $P_{el}$ ) und ist ein Maß für die zu erwartenden Jahresarbeitszahl (mit Ausnahme der klimatischen Bedingungen, Regelstrategie und Teillasteffizienzen, etc., aber nur gültig in einem stationären Betriebspunkt. Dieser COP (siehe Gl. 2) kann vereinfacht gemäß Lorenz (1894) mittels der mittleren logarithmische Quellen- ( $T_{0M}$ , siehe Gl. 3) und mittleren logarithmische Senktemperatur ( $T_{HM}$ , siehe Gl. 4), welche von den jeweiligen Ein- und Austrittstemperaturen ( $t_{0Ein}$  &  $t_{0Aus}$ ) ( $t_{RL}$  &  $t_{VL}$ ) abhängen, und dem Lorenz-Gütegrad ( $v_{Lor}$ ) abgeschätzt werden (siehe Gl. 1 und 2) (Lorenz 1894).  $v_{Lor}$  ist als das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen COP und dem vereinfachten COP nach Lorenz definiert (siehe Gl. 5).

$$COP = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \quad (1)$$

$$COP_{Lor} = \frac{T_{HM}}{T_{HM} - T_{0M}} \quad (2)$$

$$T_{0M} = \frac{t_{0Ein} - t_{0Aus}}{\ln\left(\frac{T_{0Ein}}{T_{0Aus}}\right)} \quad (3)$$

$$T_{HM} = \frac{t_{VL} - t_{RL}}{\ln\left(\frac{T_{VL}}{T_{RL}}\right)} \quad (4)$$

$$v_{Lor} = \frac{COP}{COP_{Lor}} \quad (5)$$

## 2.2 WÄREMPUMPEN BEI RADIATOR-HEIZUNGEN IN THERMISCH UNSANIERTEN GEBÄUDEN

Diese Grundlagen dienen zur Verdeutlichung, dass die Temperaturniveaus, neben der Art des Kreislaufes, Kältemittel, Kompressor-Effizienzen (isentrop und volumetrisch) einen großen Einfluss auf den COP haben.

### *Theoretische Kreislaufanalyse*

Dieser Einfluss kann auch direkt aus dem Prozess der Wärmepumpe abgelesen werden. In Abb. 2 ist eine Außenluft-Wärmepumpe (eine s.g. Kaldampfwärmepumpe, die nach dem Perkin/Evans-Prozess mit Hochdrucksammler (Receiver) arbeitet) zur Versorgung einer Fußbodenheizung dargestellt. In Abb. 3 ist der Prozess (grün) dieser Wärmepumpen (WP) im Temperatur vs. Enthalpie (t vs. h) – Diagramm dargestellt. Von 1 nach 2 sieht man die Kompression (schwarzer Balken), von 2 nach 3 die isobare Kondensation (oranger Balken), von 3 nach 4 dies isenthalpe Drosselung und von 4 nach 1 die isobare Verdampfung (grüner Balken). Druck- und Wärmeverluste bzw. -einträge wurden nicht dargestellt. Das t vs. h -Diagramm eignet sich um den Prozess in Kombination mit den s.g. Wärmetauscher-Diagrammen darzustellen. Dadurch kann der Einfluss von Eintrittstemperaturen und Massenströmen von Quelle und

Senke auf den Prozess sowie Wärmetauscher-Größe veranschaulicht werden. Des Weiteren kann der COP als Verhältnis der Strecken Kondensation (Orange) zu Kompression (Schwarz) direkt abgelesen werden, da in jeder Komponente der WP der gleiche Kältemittelmassenstrom ( $\dot{m}_{ref}$ ) strömt.

In Abb. 5 ist derselbe WP-Kreislauf für die Radiatoren-Anwendung (siehe Abb. 4) dargestellt. Ebenso zeigt die Abb. 5 den Vergleich der Prozesse der Fußbodenanwendung (mit Vor- und Rücklauf-temperaturen von 32/27°C, strichliert) im Vergleich zu Radiatoren-Anwendung (75/55°C). Wie aus dem  $t$  vs.  $h$  – Diagramm ersichtlich, sinkt die Heizleistung um ca. 15 % und die benötigte Kompressor-Leistung steigt, bei gleichem Kompressor-Hubvolumen und Niederdruck, da der Hochdruck steigt. Des Weiteren sinkt der COP um ca. 40 % bei gleichem Niederdruck. Grund dafür ist der hohe Temperaturhub, welche einen COP für Fußbodenheizung von angenommen 4 auf 2,4 reduzieren würde, wenn man Radiatoren mit 75/55 °C versorgen müsste.

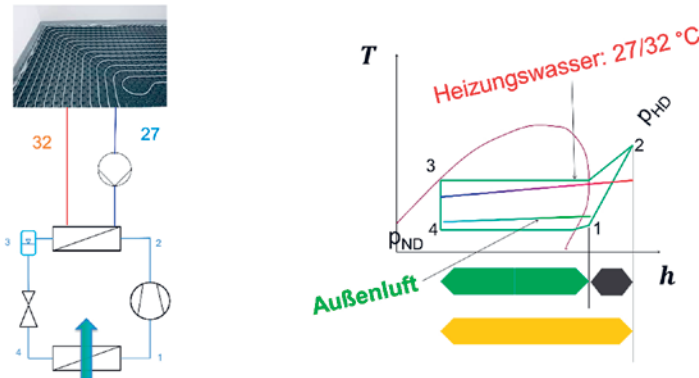


Abb. 2 (links): Symbolbild einer Wärmepumpe für Fußbodenheizung mit Temperaturniveaus  
Abb. 3 (rechts): Kalt Dampf-Kompressions-Wärmepumpen-Prozess im Temperatur vs. Enthalpie – Diagramm inkl. Temperaturniveaus der Wärmesenke und – quelle (Orange: spez. Heizleistung, Grün: spez. Quellenleistung und Schwarz: spezifische Kompressor-Leistung)

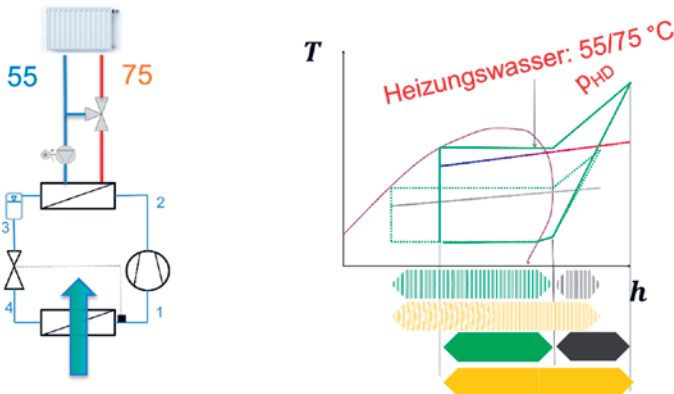


Abb. 4 (links): Symbolbild einer Wärmepumpe für Radiatoren-Heizung mit Temperaturniveaus  
Abb. 5 (rechts): Kalt Dampf-Kompressions-Wärmepumpen-Prozess im  $t$  vs.  $h$  – Diagramm inkl. Temperaturniveaus der Wärmesenke für Radiatoren-Heizung (in solid) im Vergleich Fußbodenheizung (strichliert, vgl. Abb. 3, bei gleichem Niederdruck) (Orange: spez. Heizleistung, Grün: spez. Quellenleistung und Schwarz: spezifische Kompressor-Leistung)

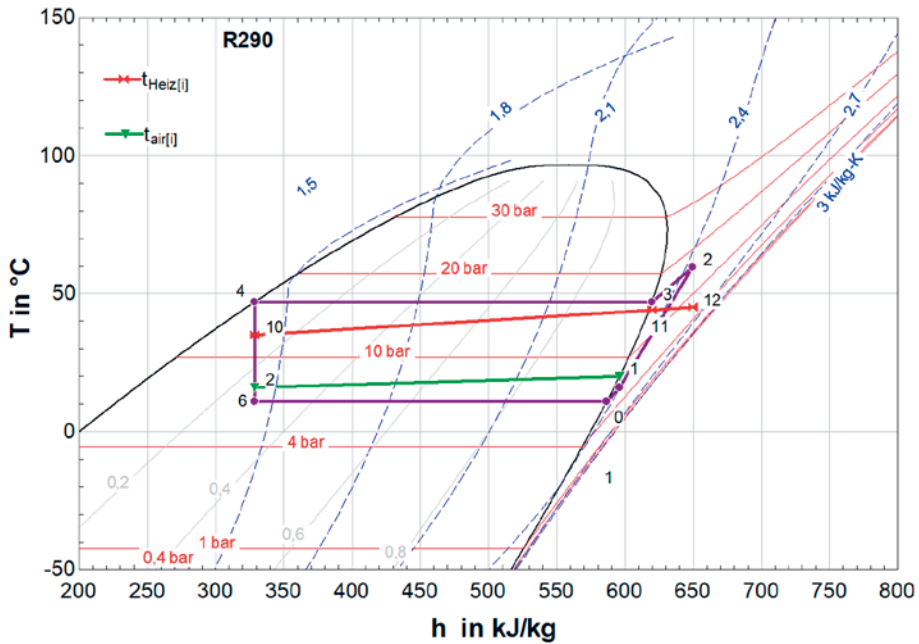


Abb. 6: WP-Prozess (violett) in  $t$  vs.  $h$  – Diagramm inkl. Temperaturniveaus der Wärmesenke (rot) und -quelle (grün) in EES (2022)

Eine detaillierte Simulationsstudie mittels EES (2022, siehe Abb. 6), basierend auf einer 0D-Analyse für das Kältemittel Propan (R290), zeigte, dass der COP und die Heizleistung bei gleichem Kompressor-Hubvolumen bei Vor- & Rücklauftemperaturen von 75/55 °C um mindestens 40 % schlechter sind als bei der Fußbodenheizung (siehe Tab. 1). Könnte die Vorlauftemperatur auf 45 °C für die Radiatoren durch Sanierungsmaßnahmen gesenkt werden, könnte der COP gegenüber den hohen Vorlauftemperaturen von 75 °C um 50 % gesteigert werden.

Tab. 1: Vergleich des COPs von 1-stufigen WP mit R290 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Heizungstemperaturen (ohne Enteisung)<sup>1)</sup>

Außenluft-Temperatur ( $t_a$ ) in °C	COP @ $t_{VL}/t_{RL}$ 35/29 °C	COP @ $t_{VL}/t_{RL}$ 45/35 °C	COP @ $t_{VL}/t_{RL}$ 75/55 °C
-15	3,1	2,7	1,8
0	4,2	3,5	2,2
7	4,9	4,1	2,5

<sup>1)</sup> Anm.: isentropen und volumetr. Kompressor-Wirkungsgrad von 80 %, Öl-Umlauf bei 10 %, Pinch-Points von 3 bis 5 K

### 2.3 WÄREMPUMPEN BEI RADIAOR-HEIZUNGEN IN THERMISCH SANIERTEN GEBÄUDEN

Um diesen schlechten COPs bei den hohen Vorlauftemperaturen entgegen zu wirken, müssen die Gebäude thermisch saniert werden, um die benötigte Heizleistung zu reduzieren. Durch diese Reduktion können auch die Radiatorleistungen gesenkt werden und damit die benötigte Vor- und Rücklauftemperatur bei bestehender Wärmeübertrager-Fläche. Gl. 6 zeigt den Heizleistungsbedarf in Abhängigkeit der Transmissions- ( $\dot{Q}_T = \sum UA * (t_i - t_a)$ ) und Lüftungswärmeverluste ( $\dot{Q}_L = nV\rho c_{pi} (t_i - t_a)$ ). Gl. 4 zeigt die Änderung der Radiatorleistung in Abhängigkeit der logarithmischen Temperaturdifferenz (Gl. 5, die von  $t_{VL}/t_{RL}$  und der Raumtemperatur ( $t_i$ ) bestimmt wird) sowie des Heizflächenexponenten ( $n$ ). Letzter hängt von der Dominanz der Wärmeübertragungsmechanismen (Strahlung vs. Konvektion) ab. Die Radiatorleistung muss die benötigte Heizleistung abdecken. Unter der Annahme das der Heizungswasser-Volumenstrom aufgrund der beibehaltenen Rohrleitungen gleichbleiben wird, ergibt sich gemäß Abb. 7, dass die benötigte Heizlast durch thermische Sanierung um 60 % gesenkt werden muss, damit die benötigte Vorlauftemperatur unter 45 °C liegt. Damit könnten wie in Tab. 1 dargestellt vertretbare COPs erreicht werden.

$$\dot{Q}_H = \sum UA * (t_i - t_a) + nV\rho c_{pi}(t_i - t_a) \quad (6)$$

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_{H_{100}}} = \left( \frac{\Delta T_{ln}}{\Delta T_{ln_{100}}} \right)^n \quad (7)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{t_{VL} - t_{RL}}{\ln\left(\frac{t_{VL} - t_i}{t_{RL} - t_i}\right)} \quad (8)$$

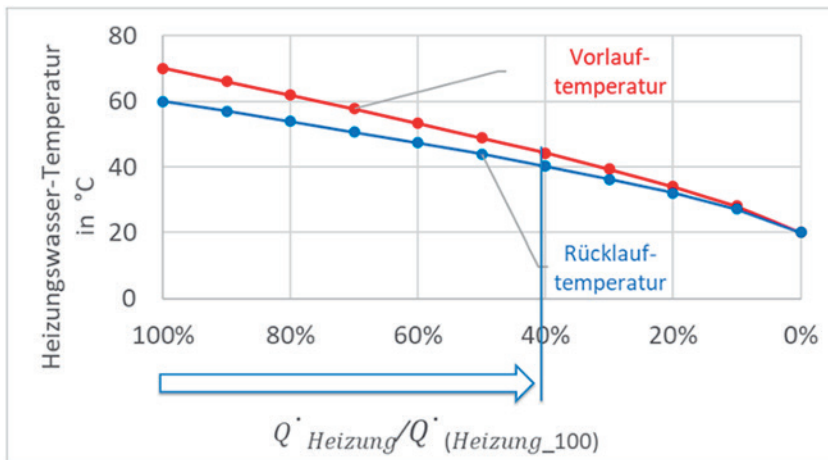


Abb. 7: Änderung der benötigten Vor- und Rücklauftemperatur bei Reduktion der benötigten Heizleistung durch Sanierung bei bestehenden Radiatorsystem ( $n=1,3$ )

## 3 BOOSTER/BASIC-WÄREMPUMPENKONZEPTE IN DER SANIERUNG

Eine weitere Alternative stellt die Booster-Wärmepumpen-Lösung dar (siehe Kleefkens et al. 2017 & Zhu et al. 2021). Diese Lösung wurde oft für die Warmwasserversorgung aufgrund der hohen benötigten Tempe-

raturen von ca. 60 °C angedacht (Masipet al. 2021). Aber wenn das Heizungstemperaturniveau über dem von Fußbodenheizung liegt, so können Booster-Wärmepumpen gemeinsam mit einer zentralen Basic-WP für die Heizungs- und/oder Warmwasserversorgung in Mehrgeschoßigen Wohnbau eingesetzt werden.

### 3.1 VERGLEICH BASIC/BOOSTER- MIT EINER EINSTUFIGEN-WP

Im Vergleich zu der einstufigen zentralen WP (Abb. 8) erschließen Booster-Wärmepumpen die Wärmequelle mittels einer Basic-Wärmepumpe über eine Niedertemperatur-Heizungsschiene (gelb/türkis in Abb. 9). Das bedeutet, dass es sich beim Konzept eine Art kaskad'ische Nutzung handelt, wobei der Niedertemperatur-Kondensator über die Niedertemperatur-Heizungsschiene mit dem Hochdruckverdampfer gekoppelt ist.

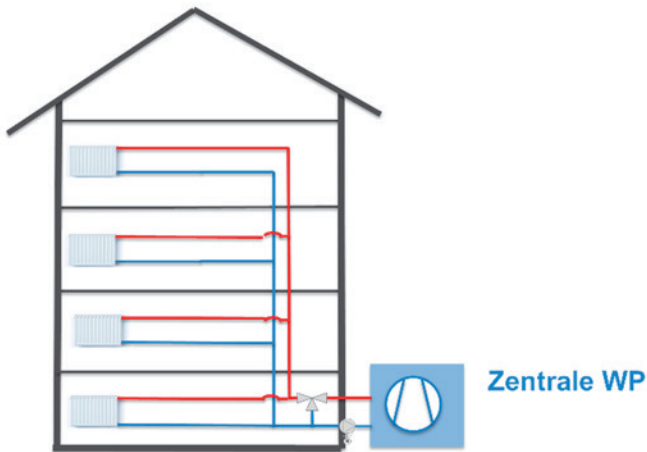


Abb. 8: Konzept zentrale Wärmepumpe für mehrgeschoßigen Wohnbau mit Radiatoren

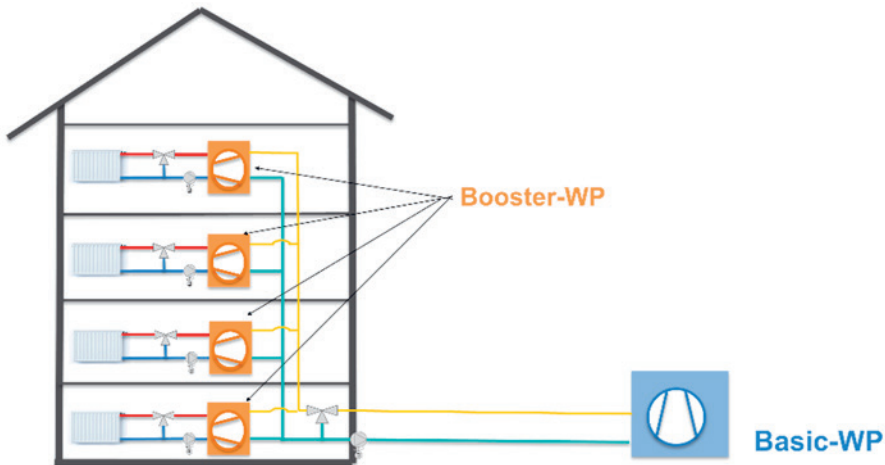


Abb. 9: Konzept Booster-Wärmepumpe mit Basic-Wärmepumpe für mehrgeschoßigen Wohnbau mit Radiatoren

Zu energetischen Bewertung der Booster/Basic-WP -Anlage wird der  $COP_{ges}$  herangezogen (siehe Gl. 9). Gemäß dem ersten Hauptsatz muss die Quellenleistung beim Booster/Basic-Konzept größer werden, als im Vergleich zum einstufigen zentralen WP -System, damit der  $COP_{ges}$  größer als der COP der zentralen WP ist (Gl. 10). Unter der Annahme, dass beide Kompressor-Leistungsaufnahmen gleich groß sein sollten, kann der  $COP_{ges}$  bezogen auf die einzelnen Teil-COPs der Booster- oder Basic-WP, gemäß Gl. 11 formuliert werden. Ergo, müssen die Teil-COPs der Kaskaden fast doppelt so hoch sein wie der geforderte  $COP_{ges}$ .

$$COP_{ges} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el,Booster} + P_{el,Basic}} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_H * \frac{COP}{COP-1} \quad (10)$$

$$COP_{ges} = \frac{COP_{Booster} - COP_{Basic} - 1}{2} \quad (11)$$

### 3.2 VERGLEICH BASIC/BOOSTER- MIT EINER ZWEISTUFIGEN-WP

Die Basic-Booster Wärmepumpen arbeiten im Verbund gestuft und meist wird in beiden WP das gleiche Kältemittel eingesetzt (siehe Abb. 10 & Abb. 11), wie z.B. Propan. Dadurch ergibt sich als idealer Prozess der zweistufige Kaltampf-Prozess, welcher das COP-Maximum für dieses System darstellt, da er ohne Niedertemperaturkreis auskommt (siehe Abb. 11 & Abb. 12). Aus diesem Maximum heraus lässt sich das ideale Temperaturniveau des Niedertemperatur-Heizkreises bestimmen. Gemäß der idealen Mitteldruckniveaus ( $p_{MD}$ ) bei gleichen Druckdifferenzen bei beiden Kompressoren, kann das Niveau als Siedetemperatur von  $p_{MD}$  für das jeweilige Kältemittel definiert werden. Bei Propan liegt dieses bei ca. 20 °C, jedoch ändert sich dieses auch mit der Außenlufttemperatur. Das tiefe Temperaturniveau begünstigt auch die Minimierung der Wärmeverluste des Speichers (im Keller). Die Spreizung sollte gegen Null gehen damit der  $COP_{ges}$  so hoch wie möglich ist.

$$p_{MD} = \sqrt{p_{HD} * p_{ND}} \quad (12)$$

$$t_{MD} = t_{sat}(p_{MD}, Ref) \quad (13)$$

So können bei richtiger Integration, um 25 % höhere COPs gegenüber einer einstufigen zentralen Wärmepumpe erzielt werden. Es muss dafür aber die zentrale Basic-Wärmepumpe groß genug ausgelegt werden, da sie mindestens die gleiche Quellen Leistung entziehen muss, wie die zentrale WP. Für höhere COPs sind größere Quellenleistungen notwendig.

Die Kompressor-Größe ( $V_{HUB}$ ) wird von der Saugseite (Dichte des Kältemittels beim Kompressor-Eintritt) bestimmt (Gl. 14). Aufgrund des höheren Flüssigkeitsanteil im Verdampfer der Basic-WP kann die benötigte Kompressor-Größe bei gleicher Quellenleistung kleiner dimensioniert werden, da die Enthalpie-Differenz im Vergleich zur einstufigen WP zunimmt (Gl. 15).

$$V_{Hub} = \frac{\dot{m}_{ref, basic}}{n * \rho_1 * \eta_{vol}} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_{ref} * (h_1 - h_4) \quad (15)$$

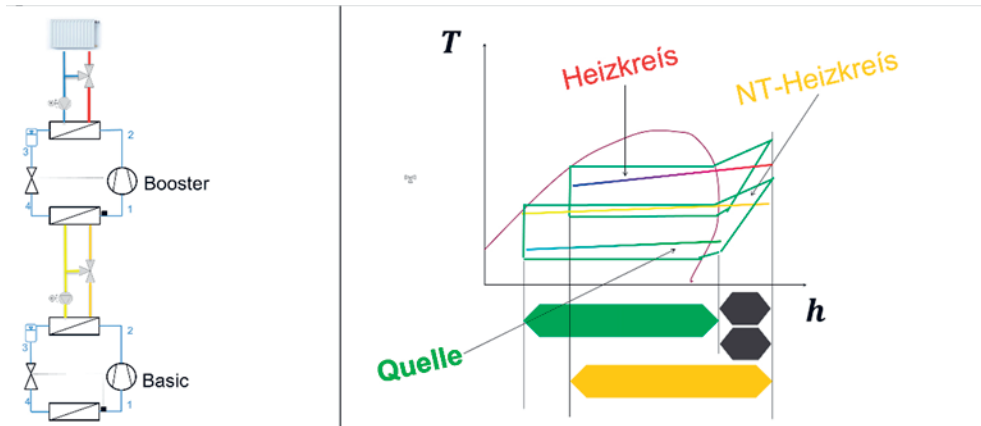


Abb. 10 (links): Symbolbild Booster/Basic-Wärmepumpenkonzepts für Radiatoren-Heizung

Abb. 11 (rechts): Booster und Basic- Kaldampf-Kompressions-Wärmepumpen-Prozesse im t vs. h - Diagramm inkl. Temperaturniveaus der Wärmesenke, NT-Heizkreis und Quelle

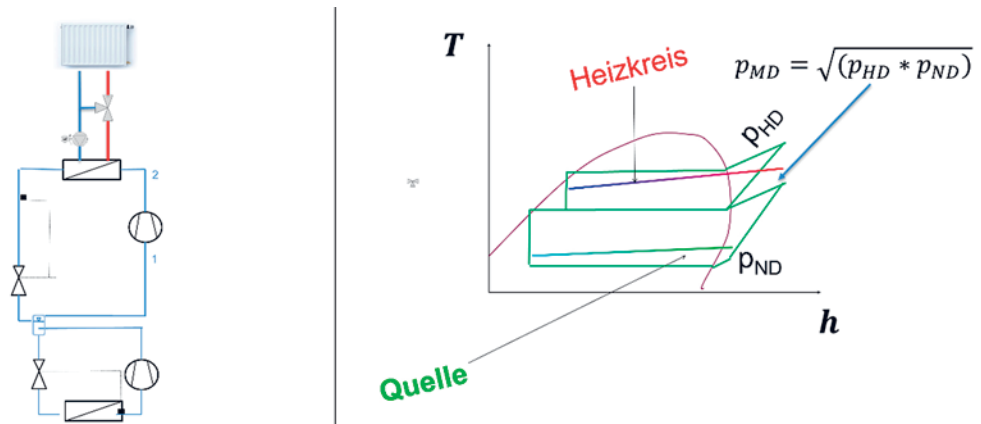


Abb. 12 (links): Symbolbild einer zweistufigen Wärmepumpe für Radiatoren-Heizung

Abb. 13 (rechts): Zweistufiger Kaldampf-Kompressions-Wärmepumpen-Prozess im t vs. h - Diagramm inkl. Temperaturniveaus der Wärmesenke für Radiatoren-Heizung

### 3.3 BASIC/BOOSTER-WP MIT ZWISCHENSPEICHER

Insbesondere könnte ein thermischer Zwischenspeicher im Niedertemperaturkreis genutzt werden (siehe Abb. 14), um die Basic-WP bei höheren Außenlufttemperaturen am Tag zu betreiben und damit höhere COPs zu erzielen. In der Nacht erfolgt die Wärmeversorgung der Wohnungen ausschließlich über die Booster-Wärmepumpen, ohne den Betrieb der Basic-Wärmepumpen. Als Quelle dient der Speicher auf Niedertemperaturniveau. Gemäß Bauer (2022) beträgt der Temperaturunterschied in Wien im Winter im Schnitt 5 K. Die Simulationen zeigten, dass wenn dieser Temperaturunterschied ausgenutzt wird, sich (siehe Tab.2) der gesamte COP<sub>ges</sub> um nochmals 10 % steigern lässt.

Tab. 2: Vergleich des COPs von Booster- und Basic-Wärmepumpen einzeln und im Verbund bei unterschiedlichen Außentemperaturen (Tag/Nacht)

	Basic-WP TAG	Basic-WP Nacht	Booster -WP
Mittlere Senkentemperatur in °C	20	20	45
Mittlere Quelltemperatur in °C	-10	-5	20
COP	3,9	4,7	5,1
COP <sub>ges</sub>	2,5	2,7	

Dadurch das die Basic-Wärmepumpe nicht in der Nacht läuft, kann auch die nächtlichen Lärmbeeinträchtigungen durch das Luftquellengebläse der Außenluft-WP vermieden werden.

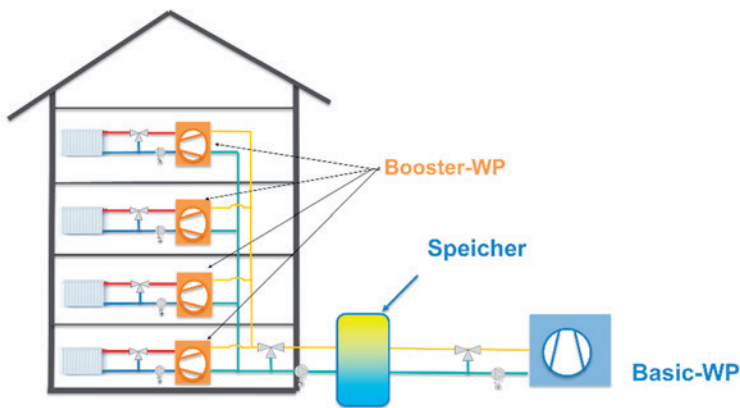


Abb. 14: Konzept Booster-Wärmepumpe mit Basic-Wärmepumpe und Zwischenspeicher für mehrgeschossigen Wohnbau mit Radiatoren

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Für den Ausstieg aus Gas in der Energie und vor allem Wärmeversorgung müssen allein in Wien über 400 000 Gas-Etagen-Thermen ausgetauscht werden. Neben dem Ausbau der Fernwärmeversorgung werden aber auch Wärmepumpen eine zentrale Rolle in urbanen Räumen einnehmen müssen.

Die Effizienz von Wärmepumpen (Leistungs- bzw. Arbeitszahl) hängt maßgeblich von der bereitzustellenden Vorlauftemperatur ab. Deshalb werden Wärmepumpen typischerweise in Kombination mit einer Flächenheizung, wie z.B. Fußbodenheizung (mit ca. 35 °C Vorlauftemperatur) betrieben. Die Leistungsabgabe von Fußbodenheizungen ist limitiert, was bei hohen Dämmstandards aber keine Herausforderung darstellt. Bei der thermischen Sanierung würde aber ein Umstieg auf eine Fußbodenheizung i.d.R. einen zu hohen invasiven Eingriff bedeuten, weshalb soweit wie möglich die bestehenden Radiatoren weiter genutzt werden sollen. Dafür ist aber auch eine entsprechende thermische Sanierung der Bestandsgebäude notwendig, um die benötigte Vorlauftemperatur bei begrenzter Wärmeübertragerfläche in den Räumen auf ein - für Wärmepumpen sinnvolles – Niveau von unter 45 °C zu senken.

Sogenannte Basic-Booster Wärmepumpen arbeiten im Verbund gestuft. Werden sowohl für die Basic- wie auch für die Booster-WP das gleiche Kältemittel verwendet, dann ist das Maximum des COPs unter dem zweistufigen Kreislauf limitiert. So können bei richtiger Integration, um 25 % höhere

Leistungszahlen gegenüber den einstufigen zentralen Wärmepumpen erzielt werden. Dabei muss die zentrale Basic-Wärmepumpe aber groß genug ausgelegt werden und das Temperaturniveau des Niedertemperaturkreises in Abhängigkeit des Mitteldruckniveaus gewählt sowie die Spreizung möglichst gering gehalten werden.

Insbesondere können mit einem Zwischenspeicher die höheren Außenlufttemperaturen vom Tag in die Nacht verlagert und damit die Booster-Wärmepumpen ohne den Betrieb der Basis-Wärmepumpen betrieben werden. Der Temperaturunterschied beträgt in Wien im Winter im Schnitt 5 °C. Daher können um ca. 10 % noch höhere Leistungszahlen als ohne Zwischenspeicher erreicht werden. Dies ist auch hilfreich, um nächtliche Lärmbelästigungen durch das Luftquellengebläse zu vermeiden.

Damit stellen die Basic-Booster-Wärmepumpen, bei richtiger Auslegung, eine energetisch sinnvolle Substitutions-Technologie der Gas-Therme in der Sanierung dar.

## LITERATUR

- Bauer C. (2022) Der Tagesgang der Temperatur – Der Unterschied zwischen Tag und Nacht, Stadt-Wien, <https://www.stadt-wien.at/freizeit/wetter/tagesgang-temperatur.html>
- Cerveny M. (2021) Raus aus der Gastherme - aber wie? (TGA Redaktion), Wien, 20.04.2021 <https://tga.at/energetraeger/raus-aus-der-gastherme-aber-wie/>
- EES (2022) Engineering Equal Solver, Version: 11.469
- Kleefkens O., Berkel J. V., Geelen C.P.J.M., Bos M. (2017) Booster Heat Pump, development of test procedure and calculation methodology in order to estimate the energy performance in various domestic applications, in Engineering, Environmental Science at HPC 2017, Published 2017, Corpus ID: 201727202
- Lorenz H. (1894) Beiträge zur Beurteilung von Kühlmaschinen, Z VDI, 38 (1894), pp. 124-130, 62–8, 98–103
- Masip, X., Prades-Gil C., Navarro-Peris E., Corberán J.M. (2021) Evaluation of the potential energy savings of a centralized booster heat pump in front of conventional alternatives, Smart Energy, Volume 4, 2021, 100056, ISSN 2666-9552,
- Wiener Tageszeitung (2021) Die letzten Tage der Therme/Bis 2040 will die Stadt Wien 470.000 Gasetagenheizungen ersetzen. Ist das überhaupt möglich?, 19.12.2021- <https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/chronik/wien-chronik/2131874-Die-letzten-Tage-der-Therme.html>
- Zhu T., Ommen T., Meesenburg W., Thorsen J.E., Elmgaard B. (2021): Steady state behavior of a booster heat pump for hot water supply in ultra-low temperature district heating network, Journal of Energy, Volume 237, 2021, 121528, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121528>.
- Zotter, G. & Ochs, F. (2022) „PhaseOut“-so gelingt der Gausausstieg, TGA, Wien, 15.09.2022; <https://tga.at/errichten/phaseout-so-gelingt-der-gausausstieg/>

### Kontakt:

Gerald Zotter  
AEE INTEC  
Feldgasse 19  
A-8200 Gleisdorf, Austria  
&  
Fachhochschule Joanneum  
Werk-VI-Straße 46 ·  
A-8605 Kapfenberg  
Tel. +43 650 891 891 5  
[gerald.zotter.gz@gmail.com](mailto:gerald.zotter.gz@gmail.com)  
[www.fh-burgenland.at/enova2023](http://www.fh-burgenland.at/enova2023)



# Session 2b

## Quartiere der Zukunft

### **DigitalTwin – Eine Methodik zur automatisierten Performance-Analyse gebäudetechnischer Anlagen**

Stelzer, Dragosits, Ziermann / Forschung Burgenland GmbH / AT

### **Datengestütztes Modell zur Performance-Analyse von Lüftungs- und Klimaanlage**

Dragosits / Forschung Burgenland GmbH / AT

### **Das Prinzip der Schallausbreitung in flüssigen und gasförmigen Medien durch die Rohrwand und deren Messgrößen**

Brunner, Halper / FLEXIM GmbH / AT

Ilko / FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH / DE



# DigitalTwin – Eine Methodik zur automatisierten Performance-Analyse gebäudetechnischer Anlagen

R. Stelzer, S. Dragosits, D. Ziermann

*Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich*

## ABSTRACT:

Buildings are realized as individual projects by a group of different experts with different subsystems, usually under high economic and time pressure. This often leads to inefficient and stressful operations which are often not recognized. Under the right conditions, these problems could be identified and corrected by experts using methods such as technical monitoring. However, this approach is time consuming and expansive, which is an obstacle for scalability. The DigitalTwin project took a methodical approach based on continuous digital mapping of the individual process steps to minimize the workload and provide easily interpretable results. In this way, major problems can be identified and corrected by the operators. But the implementation requires a digital information base. Therefore, the client's information requirements and BIM execution plan were defined and an approach using BIM modelling was developed. For the necessary unique identification of data points, different possibilities of asset identification systems were investigated. Finally, the approach according to ÖNORM B 1801-6 was applied. Bidirectional interfaces were developed to enable the digital exchange of metadata. Furthermore, the time series data were collected via building automation system and processed in a developed, open source-based system. Missing data points can be supplemented with IoT sensor technology. Role-based and model-based analytics have been developed, which are highly modular and scalable. They receive information from both mentioned systems and can automatically adapt the scope of the analyses to the available information (Fig. 3.1). The method has been tested on the components heat pump and ventilation system and can be used in different application cases. It is characterized by complex and detailed analyses combined with high scalability and a high degree of automation.

## 1 AUSGANGSLAGE

Gebäude werden im Rahmen eines individuellen Projekts errichtet und in verschiedenen Phasen abgearbeitet. Dazu wird das Projektteam in der Regel je Bauvorhaben neu aus Experten mit unterschiedlicher Kompetenz zusammengestellt. Zudem setzt sich die technische Gebäudeausrüstung oftmals aus vielen einzelnen Teilsystemen zusammen, welche schließlich zu einem komplexen Gesamtsystem verschmelzen. Die Gebäudeautomation (GA) soll letztendlich durch ein geregeltes Zusammenspiel dieser Einzelkomponenten dafür sorgen, dass die jeweiligen Anforderungen (z.B. Innenraumkomfort, Energieeffizienz) erfüllt werden und ein langlebiger Betrieb mit geringen Wartungskosten möglich ist. Allerdings kann nach der Übergabe meist die geplante Anlagen- und Energieperformance nicht eingehalten werden (Bagans et al. 2018).

Deshalb wird in der Richtlinie 2018/844/EU (2018) für Anlagen ab einer bestimmten Größe nicht nur die Implementierung eines Gebäudeautomation - Systems gefordert, sondern explizite Anforderungen an diese gestellt. Das GA-System muss in der Lage sein eine permanente Überprüfung durchzuführen und Hilfestellung bei der Optimierung anzubieten. Für einen automatisierten Prozess müssen reale Betriebsdaten in Kombination mit den Anlageninformationen (Metadaten) analysiert werden. Dabei können regelbasierte und modellbasierte Analysemethoden eingesetzt werden.

## 2 PROZESS EINER MANUELLEN PERFORMANCE ANALYSE

Aufgrund der Komplexität und Individualität von gebäudetechnischen Anlagen müssen für eine manuelle Analyse des tatsächlichen Betriebsverhaltens (Abb. 2.1) folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Ausreichend verfügbare Datenpunkte (DP) und deren Metadaten
- Mindestumfang an historischen, qualitativ ausreichender Zeitreihen je DP
- Technische Informationen über verbaute Komponenten (z.B. Wärmepumpe und Rückkühler)
- Breite Expertise und Erfahrung des Analysten

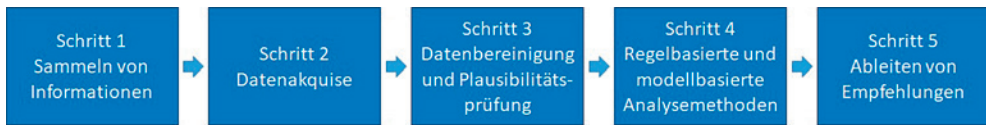


Abb. 2.1: Typische Prozessschritte für die manuelle Analyse gebäudetechnischer Anlagen

Diese Vorgehensweise ist ähnlich dem technischen Monitoring (TMon), für das bereits Leitfäden und Regelwerke wie AMEV (2020) existieren, und zielt ebenfalls auf eine Qualitätssicherung des Gebäudebetriebes ab. Der Prozess verläuft begleitend zu den bisherigen Phasen. Die Umsetzung ist beim TMon bisher nur teilweise automatisiert und es ist ein zeitintensiver manueller Prozess notwendig, wodurch die Skalierbarkeit gering bleibt.

## 3 METHODE EINER AUTOMATISIERTE PERFORMANCEANALYSE

Um die Skalierbarkeit des Prozesses zu erhöhen, müssen alle Arbeitsschritte möglichst digitalisiert werden. Abb. 3.1 zeigt diesen, im DigitalTwin-Projekt verfolgten, Ansatz.

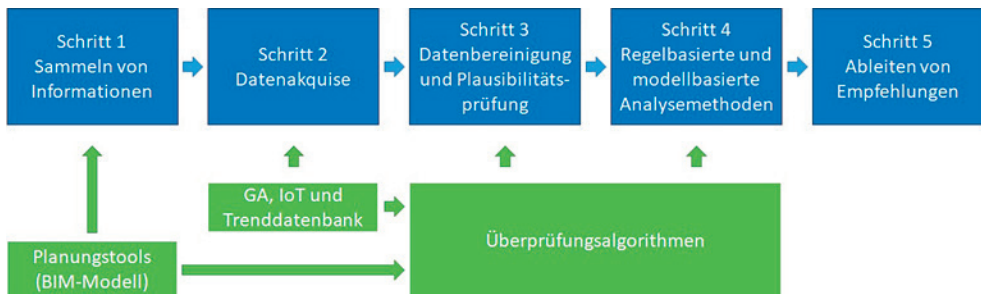


Abb. 3.1: Digitalisierte Prozessschritte für die automatische Analyse gebäudetechnischer Anlagen

### 3.1 SCHRITT 1: DIGITALISIEREN DER INFORMATIONEN

Es ist sinnvoll, die benötigten Informationen für eine spätere Performanceanalyse bereits in der Planungsphase einzufordern. Über die Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) und dem BIM-Abwicklungsplan (BAP) können diese verbindlich festgelegt werden. In den AIA ist das jeweilige zu verwendende Datenformat festzulegen. Dabei ist die eindeutige Identifikation der Systeme notwendig (z.B. durch ein Anlagenkennzeichnungssystem (AKS)). Dies betrifft den LOG (Level of Geometry) als auch den LOI (Level of Information). Eine zusätzliche Vergabe von manuellen und manipulierbaren

IDs (zusätzlich zur IFC GUID) kann zielführend sein, um eine softwareunabhängige Beschreibung zu erhalten. Die Nutzung des AKS ermöglicht konstante und eindeutige IDs und strukturelle Zusammenhänge durch den Lebenszyklus, die aus dem nativen Modell heraus mit der Nutzungssoftware verknüpft sind. (Borrmann et al. 2021)

Ein Modell kann auch über Laserscan und 3D-Fotogrammetrie aufgebaut werden und mit den Anlagedaten, Informationen und/oder Messdaten verknüpft werden. Die einzelnen Adresspunkte (AKS-Nummern) der Geräte, Anlagen und Sensoren sind mit dem Modell zu verknüpfen. Die Verwendung von konstanten IDs durch den Lebenszyklus des Gebäudes und der Anlagenbauteile ist essentiell.

Für das Projekt DigitalTwin wurde das AKS nach ÖNORM B 1801-6 angewandt. Diese Empfehlung gibt auch die Initiative „Digital Findet Stadt - Die Plattform für digitale Innovationen der Bau- und Immobilienwirtschaft“ (2022) ab.

Im Projekt musste eine Methode zur bidirektionalen AKS-Nummernvergabe mittels Revit, Dynamo und Excel entwickelt werden. Das BIM-Modell wurde mit Revit erstellt und die zusätzlichen Parameter für die AIA, unter Verwendung von Dynamo, hinzugefügt. Der digitale, bidirektionale Austausch wurde im CSV-Format abgewickelt (Abb. 3.2). Durch die Verwendung des offenen Datenaustauschformats Industry Foundation Classes (IFC) wird die Zusammenarbeit im open-BIM-Kontext ermöglicht.

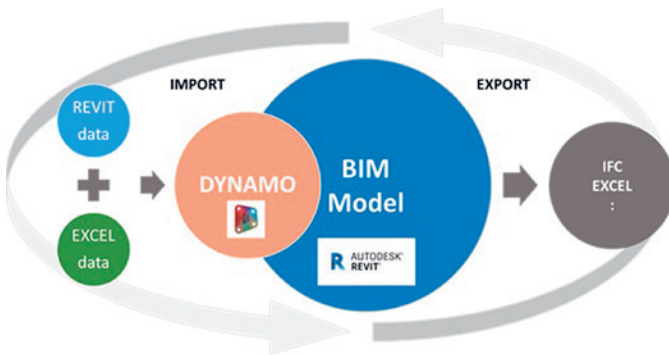


Abb. 3.2: Methode zur bidirektionalen AKS-Nummernvergabe mittels REVIT, Dynamo und Excel

### 3.2 SCHRITT 2: DATENAKQUISE

In einer konventionellen Gebäudeautomation werden einzelnen Komponenten (z.B. Temperatursensor, Stellventil) an zentralen Informationsschwerpunkten (ISP) angebunden oder über Feldbuskommunikation (z.B. KNX, Modbus, BACnet) verbunden und als DP abgebildet. Historisch wurden GA-Systeme, welche der Operational Technology (OT) zugeordnet sind, meist in abgekapselten Netzen betrieben. Damit konnte zwar eine hohe Sicherheit gewährleistet werden, der Zugriff auf die Daten wurde damit allerdings erschwert.

Auch in der Industrie wurden traditionell Information Technology (IT) und OT in zwei separaten Silos betrieben. Da beide die Leistung eines Unternehmens unabhängig voneinander beeinflussen, ermöglicht die Überbrückung der Lücke zwischen diesen Technologien ein einfacheres Leistungsmanagement. Die Schaffung einer gemeinsamen Plattform für Informationen und Betriebsdaten bedeutet, dass Unternehmen relevantere Key Performance Indicators (KPIs) generieren und gemeinsame Ziele verfolgen können, während sie gleichzeitig von der unternehmensweiten Sichtbarkeit profitieren. (Williams 2016)

Durch die Konvergenz von IT und OT werden die vorhandenen Daten nun leicht zugänglich und automatisiert nutzbar. Die Transformation ins Internet of Things (IoT) erlaubt zudem die Einbindung weiterer Kommunikationsprotokolle (z.B. MQTT, LoRa) und damit die Anreicherung der Informatio-

nen mit günstiger intelligenter Sensorik. Abb. 3.3 zeigt den Aufbau der Verschmelzung von OT mit IT im Projekt.

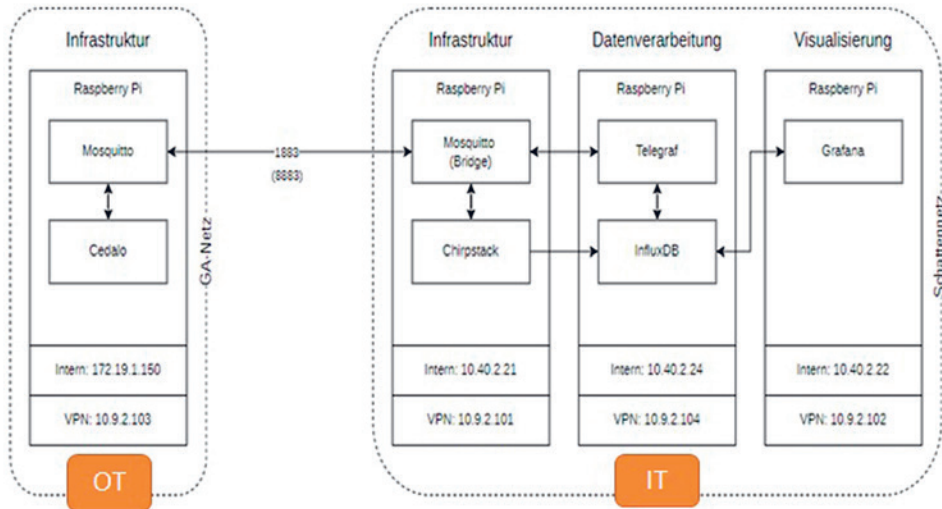


Abb. 3.3: Architektur der Edge-GA (OT) und Edge-IoT (IT) Device

Um die Sicherheit im OT-Bereich dennoch hoch zu halten, wird dieser nur minimal für eine MQTT-Kommunikation geöffnet, womit bereits ein umfassender Datenaustausch möglich ist. Sensoren und Aktoren können in beiden Systemen im Bereich „Infrastruktur“ integriert und in beiden Welten genutzt werden. Die Datenaufzeichnung erfolgt im Bereich „Datenverarbeitung“. Es werden sämtliche Werte unverändert in einer Zeitreihendatenbank (Influx-DB) gesammelt. Im Bereich „Visualisierung“ können alle aufgezeichneten und berechneten Werte über das Dashboard in Grafana angezeigt werden. Es wurden ausschließlich Open Source Tools verwendet, um Lizenzkosten zu vermeiden. Für eine Datenverfügbarkeit im Internet kann die Influx-DB auf eine Cloud-Instanz gespiegelt werden. Weiters wird ein Zugriff über eine Programmschnittstelle unterstützt. Damit werden zusätzliche, komplexe regel- und modellbasierte Analysen, wie in Kap. 3.3 beschrieben, ermöglicht. Analyseergebnisse können auf demselben Weg zurück in die Influx-DB geschrieben und beispielsweise als KPIs am Dashboard visualisiert werden.

### 3.3 SCHRITT 3 UND 4: ÜBERPRÜFUNGSALGORITHMUS

Aufbauend auf die digitalisierten Informationen aus Kap. 3.1 und Kap. 3.2 kann nun automatisiert die Datenbereinigung und Plausibilitätsprüfung erfolgen. Die maßgebenden Metainformationen für eine Identifizierung und Beurteilung eines spezifischen DP werden über die digitalisierte Planung bereitgestellt. Durch die eindeutige Kennung mittels AKS-Nummer können die Daten aus der zentralen Datenquelle (Datenbank) gelesen werden.

Um seitens der Analysen flexibel auf die verschiedenen Anlagenkonstellationen als auch auf mögliche unvollständige Datengrundlagen reagieren zu können, wurde ein modularer Modellansatz gewählt. Das Analysemodell umfasst mehrere Teilanalysen, die jeweils einen separaten Aspekt der Anlage untersuchen und abhängig von der Datenverfügbarkeit automatisch angewendet werden.

### 3.4 SCHRITT 5: ABLEITUNG VON EMPFEHLUNGEN

Für eine Beurteilung der Anlagen- und Energieperformance werden, je nach Komponente und System, spezifische KPIs, Graphen, etc. und textuelle Ergebnisse ausgegeben. Zusätzlich wird der erwartete und tatsächliche Betriebszustand verglichen. Der Benutzer erhält damit eine aussagekräftige Information über den tatsächlichen Zustand und kann gegebenenfalls gezielt Verbesserungsmaßnahmen einleiten. Zudem können die gesetzten Maßnahmen durch wiederholtes Ausführen der automatisierten Analysen überprüft werden. Da der Prozess vollständig digitalisiert ist, werden historische Entwicklungen nachvollziehbar dokumentiert.

## 4 TESTCASE WÄRMEPUMPE

Nachfolgend wird die Methodik am Test-Case Wärmepumpe dargestellt. Es wurden AKS-Nummern für die benötigten Komponenten vergeben und im BIM-Modell implementiert. In der Abb. 4.1 ist die schematische Verortung der Komponenten ersichtlich.

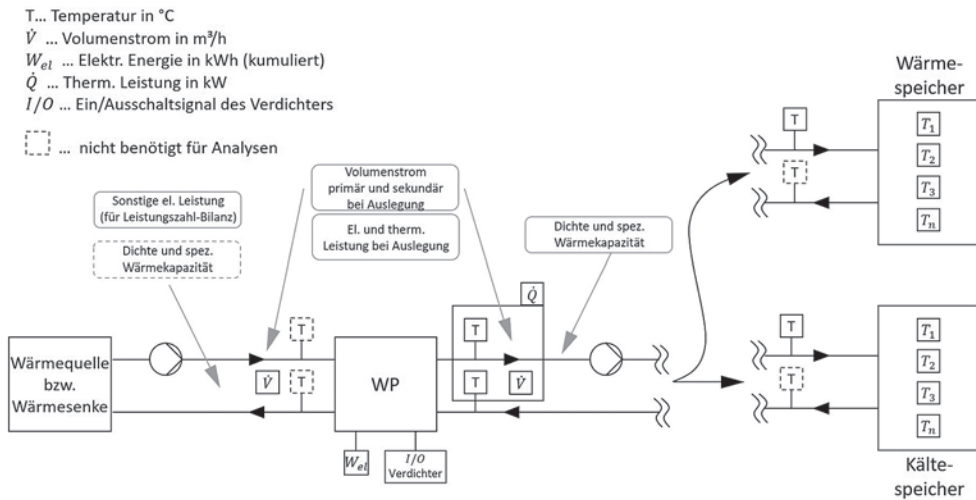


Abb. 4.1: Schematische Darstellung von Relationen einer Wärmepumpe

Der modulare Ansatz ist an der Umrandung der Sensoren erkennbar. Anhand der Darstellung können notwendige und zusätzliche DP unterschieden werden. Tab. 4.1 enthält die Vergabe des AKS nach ÖNORM B 1801-6.

Tab. 4.1: AKS nach ÖNORM B 1801-6 am Beispiel der Wärmepumpenanlage im Living Lab Energetikum

Codeteil A Liegenschaft	Codeteil B Objekt	Codeteil C Kostengruppe	Codeteil D Baugliederung	Codeteil E Leistungsgruppenebene	Codeteil F Unterleistungsruppenebene	Codeteil G Komponentenebene	Codeteil H Teil-Komponentenebene	FHB_BauteilID	Bemerkung
00001	001	BWT	3C.01.01	T87_01	01_01	10A_01		7758194	T_VL prim
00001	001	BWT	3C.01.01	T87_01	01_01	10A_02		1215467	T_RL Prim
00001	001	BWT	3C.01.01	T80_01	04_01	02E_01		8651459	V_dot prim
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_01		6457142	T_VL sek
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_02		7845135	T_RL sek
00001	001	BWT	3H.01.01	T80_01	04_01	02E_01		6492501	V_dot sek
00001	001	BWT	3F.04.01	T06_01	15_01	03A_01		1204659	Wel WP
00001	001	BWT	3C.01.01	T35_01	06_01	06A_01	01_01	4325021	//O WP
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_03		1360814	T_in Wärmespeicher
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_04		1201684	T_out Wärmespeicher
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_05		1203697	T_Wärmespeicher 1
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_06		1025493	T_Wärmespeicher 2
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_07		3500145	T_Wärmespeicher 3
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_08		2014796	T_Wärmespeicher 4
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_09		8513397	T_in Kältespeicher
00001	001	BWT	3H.01.01	T87_01	01_01	10A_10		1098706	T_out Kältespeicher
00001	001	BWT	3D.04.01	T87_01	01_01	10A_01		2084601	T_Kältespeicher 1
00001	001	BWT	3D.04.01	T87_01	01_01	10A_02		6021547	T_Kältespeicher 2
00001	001	BWT	3D.04.01	T87_01	01_01	10A_03		1324560	T_Kältespeicher 3
00001	001	BWT	3D.04.01	T87_01	01_01	10A_04		2158974	T_Kältespeicher 4

Der Algorithmus kann, wie in Abb. 3.1 gezeigt, auf die Metainformationen der BIM-Planung und auf die Messdaten aus der Datenbank, wie in Kap. 3.2 beschrieben, zugreifen. Es konnte beispielsweise ungewöhnlich häufiges Takten der Wärmepumpe aufgezeigt werden. Die durchschnittliche Zyklusdauer im Kältebetrieb betrug dabei ca. 6,3 Minuten und im Heizfall wurden ca. 14,7 Minuten festgestellt. Die Häufigkeitsverteilung der Zyklusdauern ist ebenfalls in Abb. 4.2 ersichtlich. Der SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) betrug ca. 3,4 und der SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance) ca. 3,1.

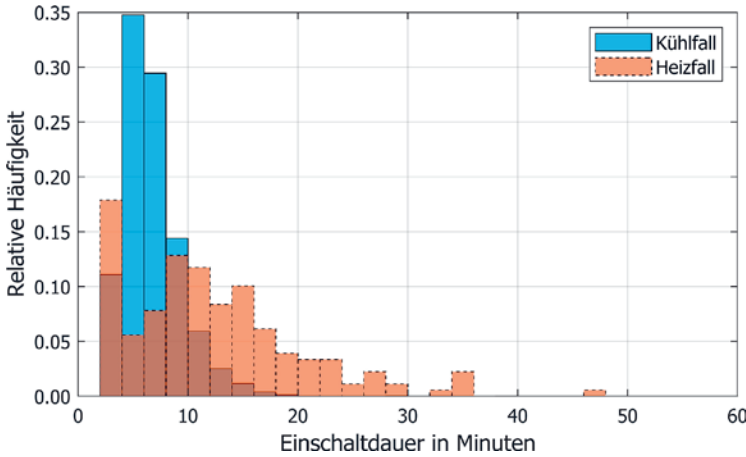


Abb. 4.2: Häufigkeitsverteilung der Zyklusdauern der untersuchten Wärmepumpe

Des Weiteren zeigte sich, dass die Umwälzpumpen primär- und sekundärseitig nahezu ständig in Betrieb waren. Das führte zu einem unnötig hohen elektrischen Energiebedarf der Pumpen. Zudem konnte im Kältespeicher keine Temperaturschichtung erreicht werden, da eine Wasserumwälzung außerhalb der Wärme- bzw. Kälteanforderung zu einer Durchmischung des Speichers führte. Im untersuchten Zeitraum wurde die Wärmepumpe hauptsächlich für die Kälteerzeugung verwendet. Diese Betriebsweise kann auch der Heatmap-Darstellung der elektrischen Verdichterleistung in Abb. 4.3 entnommen werden. Mit dieser Darstellung können die Betriebsweise und die Leistungsaufnahme über einen großen Zeitraum übersichtlich dargestellt werden.

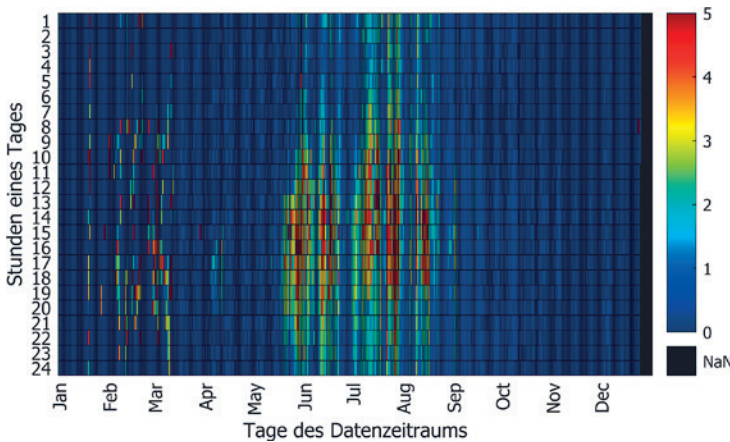


Abb. 4.3: Heatmap-Darstellung der elektrischen Verdichterleistung der Wärmepumpe

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Verschiedene Publikationen beziffern Optimierungspotential von gebäudetechnischen Anlagen im zweistelligen Prozentbereich. Um diese Effizienzlücken und wartungsintensiven Betriebsweisen zu erkennen und zu vermeiden, bedarf es Experten mit breiter Ausbildung und ausreichend Erfahrung. Diese müssen, in zeitaufwändigen Prozessen, aus den gesammelten Informationen und den vorhandenen Trenddaten die nötigen Schlüsse ziehen. Unter dem Begriff „Energiemonitoring“ (EMon) oder „Technisches Monitoring“ (TMon) werden am Markt verschiedene digitale Werkzeuge zur Unterstützung dieses Prozesses angeboten. Diese setzen dennoch die Eingabe von Anlageninformationen und den Import von aufbereiteten Trenddaten voraus. Die Analysen sind meist manuell auf die individuelle Anlage anzupassen.

Im DigitalTwin Projekt wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der auf eine durchgängige, digitale Abbildung der einzelnen Prozessschritte abzielt. Mit dieser Methode kann der Arbeitsaufwand minimiert werden. Zudem werden Ergebnisse erzeugt, die auch vom Betriebspersonal interpretiert werden können. Damit können Maßnahmen angestoßen und mit geringem personellem Aufwand evaluiert werden.

Im DigitalTwin Projekt wurden die Komponenten Wärmepumpe und Lüftungsanlage in verschiedenen Anwendungsfällen abgebildet. Der Ansatz lässt sich auf weitere Anlagenkomponenten ausdehnen.

Im Projekt wurden bestehende AKS-Ansätze untersucht, um einen möglichst allgemeingültigen Ansatz zu finden. Mit dem gewählten AKS-Schlüssel konnte eine gute Durchgängigkeit von der Planung bis zur Auswertung demonstriert werden. Allerdings zeigt sich bei allen AKS-Ansätzen, dass die eindimensionale Zuordnung nicht ausreicht, um die komplexen Zusammenhänge in gebäudetechnischen Anlagen abzubilden.

## LITERATUR

- AMEV (2020) Technisches Monitoring 2020, Geschäftsstelle des AMEV im Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Alt-Moabit 140, 10557 Berlin, abgerufen am 27.03.2023: <https://www.amev-online.de>
- Bagans M., Müller W., Özbek H., Richter-Kowalewski K. & Zeidler O. (2018) Leitfaden zum Technischen Monitoring von öffentlichen Gebäuden zur Betriebsoptimierung und Effizienzsteigerung, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Referat Z MI, Württembergische Straße 6, 10707 Berlin, abgerufen am 27.03.2023: [https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/nachhaltiges\\_bauen/download/technisches\\_monitoring/Leitfaden\\_zum\\_technischen\\_Monitoring-2018.pdf](https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/nachhaltiges_bauen/download/technisches_monitoring/Leitfaden_zum_technischen_Monitoring-2018.pdf)
- Borrmann A., König M., Koch Ch. & Beetz J. (2021) Building Information Modeling - Die BIM-Methode im Überblick, Springer Vieweg, DOI: 10.1007/978-3-658-33361-4\_1 Digital Findet Stadt (2022) [https://www.digitalfindetstadt.at/fileadmin/user\\_upload/FINAL\\_Bericht\\_Digital\\_Findet\\_Stadt\\_28012022.pdf](https://www.digitalfindetstadt.at/fileadmin/user_upload/FINAL_Bericht_Digital_Findet_Stadt_28012022.pdf)
- Richtlinie 2018/844/EU (2018) Richtlinie 2018/844/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz
- VDI 6041 (2017) Facility-Management - Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlage, CEN Europäisches Komitee für Normung, Ausgabe: 2017-07
- Williams M. (2016) The Benefits and Challenges of IT/OT Convergence: Rewriting the rules. Abgerufen am 27.03.2023 von <https://www.automation.com/en-us/articles/2016-2/the-benefits-and-challenges-of-itot-convergence-re>

Kontakt:

Roman Stelzer

Steinamangerstraße 21

7423, Pinkafeld,

Email: [roman.stelzer@forschung-burgenland.at](mailto:roman.stelzer@forschung-burgenland.at)

# Datengestütztes Modell zur Performance-Analyse von Lüftungs- und Klimaanlage

S. Dragosits

*Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

**ABSTRACT:** Technical building systems are often made up of many individual subsystems, which grow into complex overall systems. In order to analyze and evaluate the energy performance of these different systems, a flexible analysis approach is required. The analysis model for ventilation and air conditioning systems presented in this paper follows exactly this approach. Its modular structure allows the analysis of different system constellations. Depending on which components and types of components (e.g. different heat recovery systems) are present, the analysis model adapts to the inputs and calculates the most energy efficient operation. For some components, it is possible to perform advanced analyses beyond the basic level to get a more detailed picture of the system operation. In order to obtain the most meaningful analyses and results, the real part-load behavior of various components (such as a heating coils) is simulated using a variety of modeling approaches. Validation on a real air conditioning system showed that the optimization logic is able to identify and calculate the energy-efficient changes of state and that the individual part-load modeling approaches provide a good approximation of the real operating behavior.

## 1 EINLEITUNG

Gebäudetechnische Anlagen bestehen häufig aus vielen einzelnen Teilsystemen, die zusammen ein komplexes Gesamtsystem ergeben. Damit steigt jedoch auch die Wahrscheinlichkeit, dass Fehlverhalten einzelner Komponenten oder Systeme unentdeckt bleiben. Mit zunehmender Anlagengröße und -komplexität wird es aber auch schwieriger festzustellen, ob die Anlage überhaupt ein günstiges (energieeffizientes) Betriebsverhalten aufweist oder zur Erreichung der Sollwerte zu hohe Energieaufwände benötigt. Um solchen unentdeckten Ineffizienzen entgegenwirken zu können, bedarf es regelmäßiger Überprüfungen oder eines Monitoringsystems, wie es beispielsweise die Richtlinie 2018/844/EU (2018) für diverse gebäudetechnische Anlagen (abhängig von ihrer Größe) fordert. Mithilfe solcher Maßnahmen können Fehlverhalten in der jeweiligen Anlage schneller gefunden und generelle Optimierungspotentiale im Betrieb identifiziert werden, wodurch sich dementsprechend Reduktionen des Energieverbrauchs und damit der Betriebskosten realisieren lassen. In diesem Paper wird der Fokus auf die Analyse von Lüftungs- und Klimaanlage gelegt und das dazu entwickelte Analysemodell vorgestellt.

## 2 AUFBAU DES ANALYSEMODELLS

Zur Performanceanalyse von Lüftungs- und Klimaanlage wurde ein datengestütztes Analysemodell in MATLAB entwickelt, mit dem die optimalen Zustandsänderungen (minimaler Energiebedarf) einer Anlage bestimmt und dem gemessenen Betriebsverhalten gegenübergestellt werden können.

Um eine möglichst breite Anwendbarkeit gewährleisten zu können, wurde ein modularer Analyseansatz gewählt, sodass die optimale Betriebsführung für unterschiedliche Anlagekonstellationen und Komponentenarten identifiziert werden kann.

Damit das Modell das Betriebsverhalten der einzelnen Komponenten möglichst realitätsnahe nachbildet, wurden verschiedenste Modellierungsansätze hinterlegt, die das reale Teillastverhalten und die damit geänderten Rahmenbedingungen für die Luftbehandlung beschreiben sollen.

## 2.1 ERFORDERLICHE INFORMATIONEN

Je Komponente wurde eine Informationsbasis definiert, welche die Mindestanforderung zur Analyse darstellt (Basislevel). Bei einigen Komponenten können aber auch detailliertere Analysen durchgeführt werden, sofern alle zusätzlichen Informationen dafür vorhanden sind. Jedoch erhöht sich mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Analyse auch die Anzahl der erforderlichen Informationen und Messgrößen. In Abb. 1 ist ein beispielhaftes Schema einer Vollklimaanlage mit adiabater Kühlung samt erforderlicher Messgrößen dargestellt.

Für die Basisanalyse wird der Zuluft- und Abluftvolumenstrom ( $\dot{V}$ ) benötigt, sowie Temperatur ( $T$ ) und relative Feuchte ( $rF$ ) der Zuluft (ZUL), Abluft (ABL) und Außenluft (AUL). Hinsichtlich der Komponenten wird der kumulierte elektrische Energieverbrauch ( $W_{el}$ ) für die Ventilatoren (Vent) und den Dampfbefeuchter (Bef (Dampf)) benötigt. Von Vorheizregister (VHR), Nachheizregister (NHR) und Kühlregister (KR) wird jeweils die kumulierte Wärmemenge ( $Q$ ) benötigt. Bei Sprühbefeuchtern, wie jener zur adiabaten Kühlung in der Abluft, ist die kumulierte Befeuchtungsmenge ( $V$ ) erforderlich. Für die Wärmerückgewinnung im Allgemeinen ist die Lufttemperatur und -feuchte zuluftseitig nach der Wärmerückgewinnung, in diesem Fall ein Rotationswärmeübertrager (Rot-WÜ), erforderlich. Abseits der gemessenen Größen wird für die Basisanalyse zudem der Zuluft- und Abluftvolumenstrom im Auslegungszustand benötigt und je nach Art der Wärmerückgewinnung sind noch weitere Auslegungsinformationen (Temperaturen, Leistungen) notwendig.

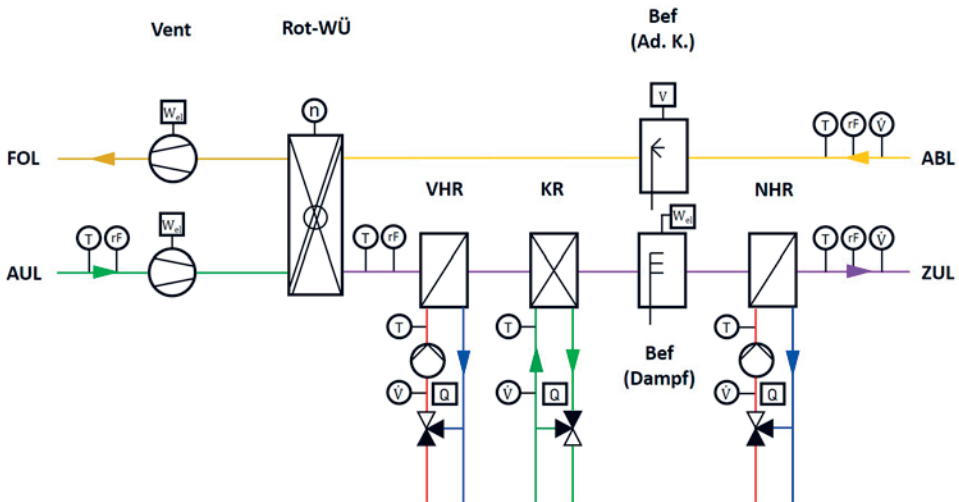


Abb. 1: Anlagenschema mit den erforderlichen Messgrößen für das Analysemodell

Für die erweiterte Analyse sind vor allem die wasserseitig gemessenen Vorlauftemperaturen und Volumenströme an den einzelnen Registern erforderlich. Ansonsten werden zudem die wasserseitigen Temperaturen, Volumenströme und Leistungen im Auslegungszustand je Register benötigt. Speziell für den Rotationswärmeübertrager ist weiters die gemessene Rotordrehzahl ( $n$ ) erforderlich.

Neben der Eingabe der zuvor erwähnten Messdaten und Auslegungsinformationen muss anschließend ausgewählt werden, in welcher Reihenfolge die Komponenten zuluftseitig und abluftseitig vorhanden sind. Des Weiteren muss ausgewählt werden, welche Art von Komponenten vorhanden sind.

Bei der Wärmerückgewinnung bestehen folgende Optionen:

- Plattenwärmeübertrager
- Rotationswärmeübertrager
  - Kondensationsrotor
  - Enthalpierotor
  - Sorptionsrotor
- Kreislaufverbundsystem (KVS)

Bei den Befeuchtern kann zwischen Dampf- und Sprühbefeuchter gewählt werden.

Zuletzt muss noch ausgewählt werden, ob für bestimmte Komponenten die erweiterte Analyse durchgeführt werden soll. Zudem müssen die Sollwerte für die Zuluft festgelegt werden. Hier können entweder die gemessene Zulufttemperatur und -feuchte hinterlegt werden, um einen direkten Vergleich des Analyseergebnisses mit dem gemessenen Zustand zu ermöglichen, oder es kann ein Sollwertbereich hinterlegt werden, mit dem Einsparpotentiale durch Anpassungen des Sollwerts aufgezeigt werden können.

Da das Analysemodell modular aufgebaut ist, hängt die Anzahl an erforderlichen Eingangsgrößen und Informationen von der zu analysierenden Anlage ab. Wenn eine Komponente nicht vorhanden ist, müssen dementsprechend auch keine Daten für diese Komponente hinterlegt werden. Je nach vorhandenen Komponenten und der ausgewählten Komponentenart müssen entsprechend auch nur jene komponentenspezifischen Informationen eingegeben werden.

## 2.2 MODELLAUFBAU

### 2.2.1 Berechnungsvorgang und Modelllogik

Basierend auf den gemessenen Luftzuständen (Außenluft und Abluft) und den ausgewählten Komponenten(-arten) sowie deren Reihenfolge in der Lüftungsanlage werden die optimalen Zustände unter Berücksichtigung des jeweiligen Betriebspunktes (Teillastverhalten) mithilfe einer eigens festgelegten Logik komponentenweise bestimmt. Dabei werden Ein- und Austrittszustände zwischen den Komponenten verknüpft, d.h. der Luftzustand am Austritt der ersten Komponenten entspricht dem Eintrittszustand der nächsten Komponente.

Die Logik ist prinzipiell so aufgebaut, dass komponentenweise überprüft wird, ob mit der aktuellen Komponente alleine die Solltemperatur und -feuchte erreicht werden kann. Ist dies der Fall, regelt die Komponente auf den Sollwert. Ansonsten wird abhängig von den weiteren Komponenten in der angegebenen Reihenfolge die Luft vorbehandelt, sodass mit den nachfolgenden Komponenten die Solltemperatur und -feuchte erreicht werden kann. Bei einem Vorheizregister wird beispielsweise überprüft, ob die aktuelle Feuchte unter dem Sollwert liegt. Wenn dies zutrifft und nach dem Vorheizregister ein Befeuchter vorhanden ist, wird die Zuluft nur soweit erwärmt, dass nach dem Befeuchter sowohl Solltemperatur als auch Sollfeuchte erreicht ist. Dabei wird die jeweils zutreffende Zustandsänderung des Befeuchters (Dampf- oder Sprühbefeuchter) berücksichtigt. Wenn mit allen vorhandenen Komponenten der Sollwert für die Zulufttemperatur oder Zuluftfeuchte nicht erreicht werden kann, wird entweder nur auf die Solltemperatur oder die nächst mögliche Zuluftfeuchte geregelt. Abhängig von der Komponente wird dann die dafür benötigte thermische Energie (Heiz- und Kühlregister), die elektrische Energie (Dampfbefeuchter) oder die Befeuchtungsmenge (Sprühbefeuchter bzw. adiabate Kühlung) bestimmt.

### 2.2.2 Berücksichtigung des realen Teillastverhaltens

Zur Berücksichtigung des Teillastverhaltens bei Rotationswärmeübertragern wird auf die Berechnungsstruktur nach ÖNORM EN 16798-5-1 (2017) samt Änderung ÖNORM EN 16798-5-1/A1 (2020) zurückgegriffen. Der Temperatur- und der Feuchteübertragungsgrad ( $\eta_{hr}$  und  $\eta_{xr}$ ) im Teillastfall wird mithilfe Gleichung 1 (Temperaturübertragungsgrad) und Gleichung 2 (Feuchteübertragungsgrad) be-

stimmt. Die prinzipielle Vorgangsweise ist hier, einen Bezugswert ( $\eta_{hr,nom}$  und  $\eta_{xr,nom}$ ) mit Korrekturfaktoren für das Teillastverhalten zu korrigieren.

$$\eta_{hr} = \eta_{hr,nom} \cdot f_q \cdot f_v \cdot f_n \quad (1)$$

$$\eta_{xr} = \eta_{xr,nom} \cdot f_{\Delta x;x} \cdot f_{q;x} \cdot f_{v;x} \cdot f_{n;x} \quad (2)$$

Folgende Aspekte werden mithilfe der Korrekturfaktoren berücksichtigt:

- Verhältnis zwischen Zuluft- und Abluftvolumenstrom ( $f_q$  und  $f_{q;x}$ )
- Abweichung der Luftgeschwindigkeit vom Bezugswert ( $f_v$  und  $f_{v;x}$ )
- Abweichung der Rotordrehzahl vom Bezugswert ( $f_n$  und  $f_{n;x}$ )
- Abweichung des Kondensationspotentials vom Bezugswert ( $f_{\Delta x;x}$ )

Mit diesen Gleichungen samt den angegebenen Modellkonstanten können die sich im Teillastbetrieb ergebenden Übertragungsgrade berechnet bzw. die erforderliche Rotordrehzahl zur Erreichung der Sollwerte unter Berücksichtigung des realen Teillastverhaltens bestimmt werden.

Für die Nachbildung des Teillastverhaltens von Wärmeübertragern (z.B. Plattenwärmeübertrager oder Heizregister) wird auf das NTU-Verfahren nach Mitchell & Braun (2012) zurückgegriffen. Die (Gesamt-)Wärmeübertragungsfähigkeit eines Wärmeübertragers wird beim NTU-Verfahren zur Bestimmung dessen Temperaturübertragungsgrades benötigt. Zur Bestimmung der Wärmeübertragungsfähigkeit sind normalerweise detaillierte Informationen zu Aufbau und Geometrie des Wärmeübertragers notwendig. Diese Informationen sind bei Bestandsanlagen meist nicht bekannt, weshalb eine alternative Berechnungsmöglichkeit herangezogen wird. Mit der Näherungsgleichung nach Kaup (2015), ersichtlich als Gleichung 3, kann der Wärmeübertragungsgrad ( $UA$ ) bei geänderten bzw. verringerten Volumenströmen luft- und wasserseitig (Teillastbetrieb) bestimmt werden. Ähnlich wie bei den Gleichungen für Rotationswärmeübertrager wird ein Bezugswert mit „Korrekturfaktoren“ korrigiert. Als Bezugswert wird die Wärmeübertragungsfähigkeit im Auslegungszustand ( $UA_{ref}$ ) verwendet und mit dem Verhältnis aus aktuellem Volumenstrom (luftseitig:  $\dot{V}_L$ ; wasserseitig:  $\dot{V}_W$ ) zu Auslegungsvolumenstrom (luftseitig:  $\dot{V}_{L,ref}$ ; wasserseitig:  $\dot{V}_{W,ref}$ ) unter Berücksichtigung des Exponenten  $n$  auf die Wärmeübertragungsfähigkeit im aktuellen Betriebspunkt umgerechnet.

$$UA = UA_{ref} \cdot \left[ \left( \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{L,ref}} \right) \cdot \left( \frac{\dot{V}_W}{\dot{V}_{W,ref}} \right) \right]^n \quad (3)$$

Für den Exponent gibt Kaup (2015) den Wert 0,4 an und die Ungenauigkeit dieses Ansatzes liegt bei  $\pm 3\%$  innerhalb der Wertegrenzen luftseitig  $0,4 < \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{L,ref}} < 1,6$  und wasserseitig  $0,8 < \frac{\dot{V}_W}{\dot{V}_{W,ref}} < 1,4$ .

### 2.2.3 Sonstige Bestandteile des Analysemodells

Zusätzlich zum eigentlichen Analysemodell gibt es einige erweiterte Aspekte im Modell, welche die Bedienung erleichtern und generell die Robustheit erhöhen sollen:

- Eingabekontrolle
- Resampling
- Datenaufbereitung und Überprüfung der Datenqualität

Die Eingabekontrolle überprüft, ob für die ausgewählten Komponenten und Analysen alle Information vorhanden sind, ansonsten wird automatisch eine Fehlermeldung mit Korrekturhinweis ausgegeben. Da für die Analyse Messdaten erforderlich sind und diese meist unterschiedliche zeitliche Auflösungen aufweisen, werden die Eingangsdaten im Modell automatisch auf eine einheitliche und konstante Zeitschrittweite resampelt, da dies eine Voraussetzung für die Analysen ist. Zusätzlich werden die Messdaten hinsichtlich ihrer Qualität überprüft und Datenausreißer bereinigt. Die Ergebnisse der Datenqualitätsüberprüfung (der Rohdaten) werden gespeichert, sodass damit die Aussagekraft der einzelnen Datenreihen grob überprüft werden kann (falls die Analyse unplausible Ergebnisse ergibt).

### 2.3 MODELLERGEBNISSE

Mit dem Basis-Analyselevel werden die berechneten Energien und Befeuchtungsmengen den entsprechenden gemessenen Größen gegenübergestellt, sowie der berechnete Austrittszustand aus der Wärmerückgewinnung mit dem gemessenen verglichen. Wenn als Sollwert der gemessene Zuluftzustand hinterlegt wurde, kann das Betriebsverhalten der untersuchten Anlage direkt mit dem Modell verglichen werden. Bei Hinterlegung eines Sollwertbereichs kann beispielsweise das energetische Einsparpotential durch die jeweilige Anpassung des Sollwerts sichtbar gemacht werden.

Mit den erweiterten Analysen wird das berechnete Teillastverhalten der Komponenten mit den gemessenen verglichen. Vor allem bei den Registern wird dabei die Betrachtungsgrenze ausgeweitet und die berechneten erforderlichen Größen wasserseitig (Vorlauftemperatur oder Volumenstrom) mit den gemessenen Werten gegenübergestellt. Hiermit kann festgestellt werden, ob beispielsweise die Wärmeübertragung wie gewollt funktioniert oder bei einer bestimmten Komponente fehlerhaft ist. Zudem können weitere Einsparpotentiale damit aufgezeigt werden, wenn z.B. die gemessene Vorlauftemperatur eines Heizregister deutlich über dem berechneten Optimum liegt.

## 3 VALIDIERUNG

Das entwickelte Analysemodell wurde anhand einer realen Vollklimaanlage mit Rotationswärmeübertrager (Sorptionsrotor) getestet. Der Aufbau der Anlage entspricht jener schematischen Darstellung in Abb. 1. Die Anlage umfasst grundsätzlich auch eine adiabate Kühlung, diese wurde jedoch nicht betrieben und somit nicht berücksichtigt.

Um die Genauigkeit des Teillastansatzes für den Rotationswärmeübertrager (nach ÖNORM EN 16798-5-1 (2017) und ÖNORM EN 16798-5-1/A1 (2020)) zu überprüfen, wurde die gemessene Rotordrehzahl aufgeprägt und die Regelung deaktiviert. Dabei konnte die Austrittstemperatur sehr exakt bestimmt werden, die Abweichung vom Messwert lag im Schnitt unter 2 %. Bei Befeuchtung lag die berechnete (absolute) Austrittsfeuchte durchschnittlich um ca. 6 % höher als der Messwert, die berechnete Feuchteübertragung fiel somit etwas besser als die reale Feuchteübertragung aus. Beim Entfeuchtungsbetrieb lag die berechnete Austrittsfeuchte im Schnitt um ca. 6 % unter dem Messwert und die berechnete Feuchterückgewinnung war damit in diesen Zeiträumen etwas schlechter.

Um nun auch die Optimierungslogik der einzelnen Komponenten sowie im Zusammenspiel zu überprüfen, wurde der gemessene Austrittszustand nach der Wärmerückgewinnung hinterlegt. Da das Teillastmodell prinzipiell eine gute Näherung an das reale Verhalten darstellt, sollten dennoch die Abweichungen bei der Feuchterückgewinnung nicht an die restlichen Berechnungen weitergegeben werden, um einen möglichst genauen Vergleich der restlichen Komponenten zu erlauben.

In Tab. 1 sind die berechneten Energieverbräuche den Messwerten gegenübergestellt. Die größte Abweichung ist bei den Heizregistern zu verzeichnen. Grund hierfür ist vor allem das tägliche Anfahrverhalten der Anlage. Wenn die Anlage eingeschaltet wird, werden die beiden Register (neben der Wärmerückgewinnung) mit einer großen Leistung beliefert, um die Lufttemperatur vom ausgekühlten Zustand wiederaufzuheizen. Um die Zuluft auf die Solltemperatur zu erwärmen, reicht laut Analysemodell jedoch eine geringere Wärmemenge aus, wodurch sich die Differenz zwischen berechnetem Wert

und Messwert mit den untersuchten Tagen aufsummierte. Besonders stark tritt dieser Effekt bei dem Nachheizregister auf. Im untersuchten Zeitraum war der Einsatz des Nachheizregister kaum notwendig und der Unterschied der Energieverbräuche ist nur auf den Aufheizvorgang zurückzuführen. Zur detaillierteren Überprüfung wurde schließlich auch das gemessene Einschaltsignal der Pumpe und die Ventilstellung ausgewertet und beide Messverläufe bestätigten dieses Betriebsverhalten.

Tab. 1: Analyseergebnis der Energieverbräuche der einzelnen Komponenten in kWh

Komponente	gemessen	berechnet
Vorheizregister	647,0	606,0
Kühlregister	7,0	9,2
Dampfbefeuchter	1420,8	1348,5
Nachheizregister	18,0	1,2

Bei dem untersuchten Zeitraum handelte es sich um zwei Monate in der Übergangszeit (März und April) wodurch das Kühlregister selten betrieben werden musste. Die Abweichung des berechneten Energieverbrauchs vom gemessenen lässt sich vor allem auf eine Unstimmigkeit bei den Messwerten zurückführen, wodurch ein Entfeuchtungsbedarf vom Modell erkannt wurde, real das Kühlregister aber nicht in Betrieb war. Der Unterschied der Energieverbräuche beim Dampfbefeuchter kann darauf zurückgeführt werden, dass der Messwert ein elektrischer Energieverbrauch ist und nur die thermische Energie berechnet wird. Daraus ergibt sich, dass bei dem Messwert auch etwaige Verluste inkludiert sind, während der berechnete Wert die effektiv an die Luft weitergegebene Energie darstellt. Dennoch erscheint die Abweichung vergleichsweise gering, was für einen effizienten Befeuchtungsvorgang spricht.

Zur Überprüfung des Teillast-Berechnungsansatzes für Wärmeübertrager wurde die erforderliche Vorlauftemperatur für das Vorheizregister berechnet und mit dem gemessenen Wert verglichen. In Abb. 2 ist anhand des beispielhaften Tagesverlaufs zu erkennen, dass bei Anlagenstart die Abweichung am größten ist, ansonsten liegt die berechnete Temperatur im unteren Wertebereich der Messwerte. Diese Situation deckt sich auch mit den Abweichungen des Energieverbrauchs, wo hauptsächlich das Anfahrverhalten die Abweichung verursacht hat. Der konstante Verlauf im restlichen Zeitraum entspricht dem hinterlegten Default-Wert (20 °C) außerhalb der Betriebszeiten. Anhand der Werte im normalen Anlagenbetrieb kann somit festgehalten werden, dass der verwendete Berechnungsansatz eine gute Näherung des realen Teillastverhaltens darstellt.

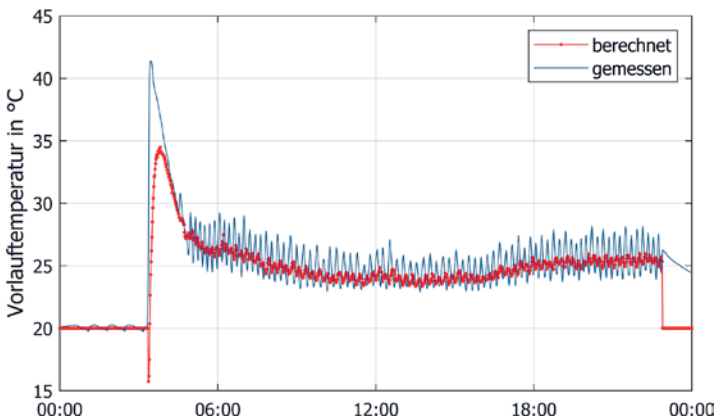


Abb. 2: Vorlauftemperatur des Vorheizregisters im Teillastbetrieb für einen beispielhaften Tag

Mithilfe des NTU-Verfahrens für nasse Wärmeübertrager kann das Teillastverhalten von Kühlregistern mit Entfeuchtungsfunktion berücksichtigt werden. Da die Näherungsgleichung nach Kaup (2015) prinzipiell nur für trockene Wärmeübertrager vorgesehen ist, wurde mithilfe von Herstellerdaten überprüft, wie gut sie auch für nasse Wärmeübertrager zutrifft. In Abb. 3 ist die mit der Näherungsgleichung berechnete Leistung den Herstellerangaben gegenübergestellt. Bei perfekter Übereinstimmung würden die Ergebnisse (schwarze Kreuze) entlang der Diagonale liegen und je größer die Abweichung, desto weiter wäre die Entfernung.

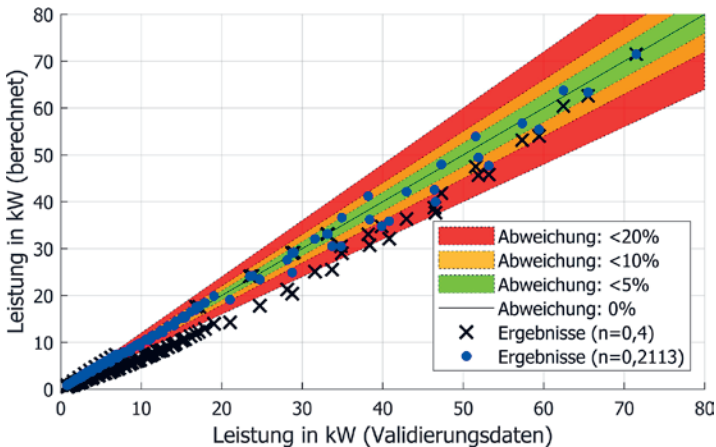


Abb. 3: Validierungsergebnis für nasses NTU-Verfahren mit originalem (0,4) und neu parametrimtem Exponenten (0,2113)

Ersichtlich ist, dass im hohen Leistungsbereich, also in der Nähe des Bezugspunktes, geringere Abweichungen vorhanden sind, als im restlichen Bereich. Da mit einem Exponenten von 0,4 nur mäßige Ergebnisse erzielt wurden, sollte mithilfe eines Optimierers der Exponent bestimmt werden, bei dem die Näherung die geringste Abweichung über den gesamten Leistungsbereich aufweist. Daraus resultierte ein neuer Exponent mit dem Wert 0,2113. Die sich daraus nun ergebenden Leistungswerte sind ebenfalls in Abb. 3 dargestellt (blaue Punkte). Im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Standardwert von 0,4 sind hier die Ergebnisse deutlich mehr um die Diagonale konzentriert, was eine generelle Genauigkeitssteigerung bedeutet. Die mittlere Leistungsabweichung von den Herstellerdaten liegt nun bei ca. 5 %. Aufgrund dieses guten Ergebnisses wurde die Näherungsgleichung mit angepasstem Exponenten auch für die Bestimmung des Teillastverhaltens nasser Wärmeübertrager (Kühlregister) im Analysemodell implementiert.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem hier präsentierten Analysemodell ist es möglich, Lüftungs- und Klimaanlage hinsichtlich ihrer energetischen Performance zu analysieren. Aufgrund des modularen Aufbaus erlaubt das Modell die Analyse vieler verschiedener Anlagenkonstellationen und ist damit breit anwendbar. Durch die Verwendung diverser Modellgleichungen zur Nachbildung des Teillastverhaltens der einzelnen Komponenten wird die direkte Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse mit dem gemessenen Betriebsverhalten ermöglicht. Die Validierung des Analysemodells und der einzelnen Teillast-Berechnungsansätze zeigte, dass die hinterlegte Logik die energieeffizienten Zustandsänderungen erkennen und berechnen kann und die einzelnen Modellgleichungen das reale Teillastverhalten mit guter Genauigkeit nachbilden.

## LITERATUR

- Kaup C. (2015) Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung. TGA Fachplaner Heft 03-2015. Klimatechnik, Seite 38
- Mitchell W. J. & Braun E. J. (2012) Principles of Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Buildings. ISBN 978-0-470-62457-9. USA. Verlag Wiley. Seite 349-353 und 362-368
- ÖNORM EN 16798-5-1:2017 12 01, (2017) Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 5-1: Berechnungsmethoden für den Energiebedarf von Lüftungs- und Klimaanlage (Module M5-6, M5-8, M6-5, M6-8, M7-5, M7-8) – Methode 1: Verteilung und Erzeugung. Österreichisches Normungsinstitut
- ÖNORM EN 16798-5-1/A1:2020 01 15, (2020) Änderung der ÖNORM EN 16798-5-1:2017 12 01. Austrian Standards International
- Richtlinie 2018/844/EU (2018) Richtlinie 2018/844/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz

### Kontakt:

Sebastian Dragosits  
Steinamangerstraße 21  
7423, Pinkafeld,  
Email: [sebastian.dragosits@forschung-burgenland.at](mailto:sebastian.dragosits@forschung-burgenland.at)

# Das Prinzip der Schallausbreitung in flüssigen und gasförmigen Medien durch die Rohrwand und deren Messgrößen

P. Brunner<sup>1)</sup>, J. Ilko<sup>2)</sup>, C. Halper<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> FLEXIM GmbH, Olbendorf, Österreich

<sup>2)</sup> FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH, Berlin, Deutschland

**ABSTRACT:** In der technischen Praxis steht heute ein breites Spektrum an genauen und zuverlässigen Messgeräten und Instrumenten mit mehreren Messmethoden zur Verfügung. Fortschritte auf dem Gebiet der Informationstechnologie und die Verkleinerung und Integration elektronischer Elemente haben den Charakter und die Variabilität von Messsystemen erheblich bereichert.

Eine wichtige Rolle in modernen technischen Ansätzen spielen kontaktlose, medienunberührte Messverfahren. Diese bringen eine Reihe von Vorteilen, wie etwa die Variabilität, Zuverlässigkeit, und Lebensdauer von Systemen - vor allem aber die Service- und Betriebssicherheit mit sich. Im Folgenden wird die Funktionsweise der nichtinvasiven Ultraschallmessverfahren beschrieben und ausgewählte Anwendungen dieser Verfahren vorgestellt. Im Speziellen werden Durchfluss- und Energiemessungen mit Fokus auf den Gebäude- und Energiesektor vorgestellt.

## 1 EINLEITUNG

Ultraschallmessverfahren werden neben dem Gebäude- und Energiesektor auch in der Wasserwirtschaft, der chemischen und petrochemischen Industrie und vielen weiteren Branchen eingesetzt, um „Standardmessungen“ aber auch Messungen unter anspruchsvollsten Prozessbedingungen zu realisieren. Es ist dabei kein physischer Eingriff in das Rohrsystem erforderlich.

Das Ultraschallmessverfahren arbeitet somit vom überwachten Prozess isoliert und das Messequipment berührt das zu messende Medium nicht. Sensoren und Messtechnik sind sowohl in portabler als auch in stationärer Ausführung erhältlich. Ein großer Vorteil der Messmethode ist die schnelle Montage von außerhalb der Rohrleitung mittels Schiene und Spannband. Dies ermöglicht nahezu ohne Einschränkungen, den einfachen Standort- oder Messstellenwechsel.

Im Folgenden wird die Funktionsweise der Messverfahren erklärt, neueste technische Entwicklungen erörtert und der Praxisbezug zu industriellen und gebäudetechnischen Anwendungen hergestellt.

## 2 AUSGEWÄHLTE ANWENDUNGEN DER ULTRASCHALLMESSUNG IN DER ENERGIEPRAXIS

### 2.1 DAMPFDURCHFLUSSMESSUNG

In industriellen Bereichen wird Dampf häufig zur Wärmeversorgung, Trocknung und Reinigung verwendet. Aus Sicht des Energiemanagements ist es wichtig, die Dampfdurchflüsse zu kennen um daraus Rückschlüsse auf etwaige Einsparungspotenziale ziehen zu können. Heute sind wir in der Lage Satt-dampf und überhitzten Dampf von außerhalb der Rohrleitung zu messen (Akahane et al. 2021).

#### 2.1.1 Dampfdurchflussmessung nach der Laufzeitdifferenzmethode

Mittels der Laufzeitdifferenzmethode (Abb. 1 und Abb. 2) ist die Messung von Volumen- und Massestrom von Satt-dampf und überhitztem Dampf bei Medientemperaturen bis 180 °C möglich (FLEXIM 2022a).

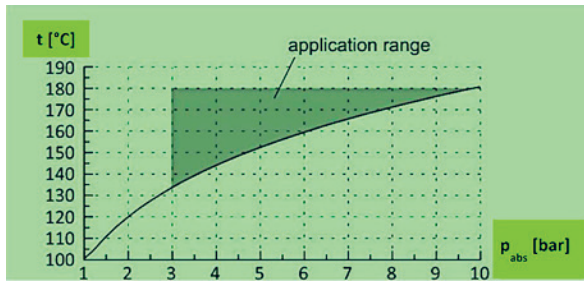


Abb. 1: Applikationsbereich der Laufzeitdifferenzmethode

Die Laufzeitdifferenzmethode stellt die „altbewährte“ Methode dar, mittels Ultraschalltechnologie die Strömungsgeschwindigkeit eines flüssigen oder gasförmigen Mediums im Rohr zu erfassen (Berling et al. 2009).

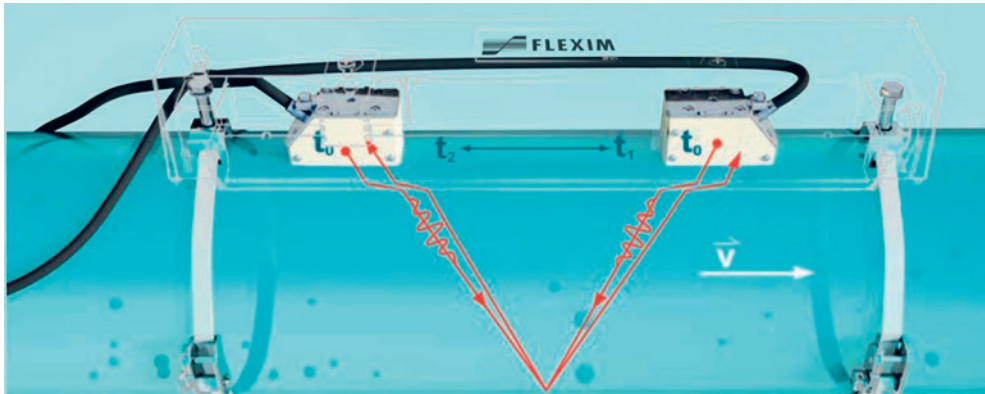


Abb. 2: Messprinzip der Laufzeitdifferenzmessung (FLEXIM 2023b)

Für die Laufzeitdifferenzmessung werden zwei Ultraschallsensoren extern an die Prozessleitung montiert. Die Ultraschallwellen werden von einem Sensor ausgesandt, durchdringen Rohrwand und Fluid und werden vom zweiten Sensor wieder empfangen. Danach werden Sender und Empfänger umgekehrt und die Ultraschallwellen in die Gegenrichtung ausgesandt. Die gemessenen Laufzeiten der beiden Signale werden von der Strömung beeinflusst, sodass in Strömungsrichtung das Signal schneller vom Sender beim Empfänger ist als in der Gegenrichtung. Der Unterschied in der Ausbreitungszeit der beiden Signale – die Laufzeitdifferenz – ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Mediums. Anhand der folgenden Formel wird aus der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit der Volumenstrom errechnet (Berling et al. 2009):

$$Q = K_{RE} \times A \times k_{\alpha} \times \frac{\Delta t}{2 \times t_t}$$

$Q$  - Volumenstrom  
 $K_{RE}$  - strömungsmechanischer Korrekturfaktor  
 $A$  - Rohrquerschnittsfläche  
 $k_{\alpha}$  - Messumformer-Konstante  
 $\Delta t$  - Laufzeitdifferenz  
 $t_t$  - Laufzeit des Mediums

Mit der Laufzeitdifferenzmethode kann die Dampfmenge bei Fluidtemperaturen unter 180 °C sowohl von stationären als auch von portablen Durchflussmessgeräten gemessen werden. Flexim bietet hier eine Auswahl an Messgeräten in allen verfügbaren Serien an, für Standardanwendungen im Non-Ex-Bereich, bis hin zu speziell ausgestatteten Geräten für den Ex-Zonen-Betrieb.

### 2.1.2 Dampfdurchflussmessung nach dem CFM (Correlation-Flow-Measurement) -Verfahren

Fließende Fluide zeichnen sich durch ein bestimmtes Strömungsprofil aus, welches in lamina-re und turbulente Strömung eingeteilt wird. Besonders schnell fließende Fluide wie überhitzter Dampf zeichnen sich durch ein turbulentes Strömungsprofil aus. Die Turbulenzen bzw. Verwirbelungen zeigen eine Art Muster. Die Ultraschallsignale werden durch diese Verwirbelungen in Amplitude und Phase moduliert. Da sich die Wirbel mit der Strömung bewegen, passieren sie zunächst die erste und danach die zweite Messschranke (Abb. 3) mit einem Zeitversatz  $\Delta t$ , sodass auch die Modulationsmuster der Ultraschallsignale der beiden Messschranken um  $\Delta t$  versetzt sind (FLEXIM 2022c).

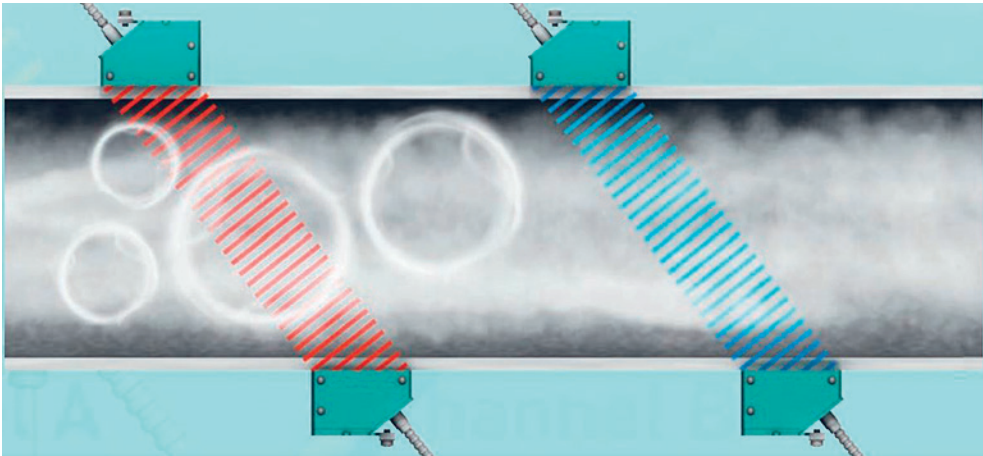


Abb. 3: Messprinzip des CFM-Messverfahrens (FLEXIM 2023b)

Dieser Zeitversatz  $\Delta t$  wird mittels Kreuzkorrelation der Modulationssignale gemessen und verhält sich proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Wie bei der Laufzeitdifferenzmessung wird anhand der Rohrparameter der Volumen- bzw. Massestrom errechnet (FLEXIM 2022c).

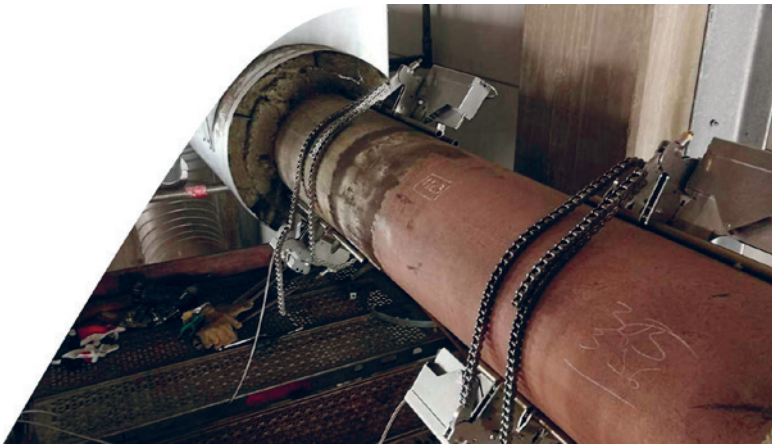


Abb. 4: CFM-Messaufbau

Stationäre FLEXIM Durchflussmessgeräte verwenden das CFM-Messverfahren unter anderem für Dampfmengenmessungen bei Fluidtemperaturen über 180 °C. Sie werden mit 2 Sensorenpaaren ausgestattet und während des Betriebes mit speziellen Halterungen – den Wave-Injectoren – außen am Rohr installiert (Abb. 4 und Tab.1). Die Wave-Injectoren entkoppeln die Sensoren thermisch vom Rohr und sorgen damit dafür, dass diese nicht überhitzen (FLEXIM 2022c).

Tab. 1: Parameter der Dampfdurchflussmessung nach der CFM-Methode (FLEXIM 2022c)

Druckbereich	1...110 bar(a)
Temperaturbereich	100 °C...630 °C
Rohrdurchmesser (ID)	10...900 mm
Messunsicherheit	+/-3 % (>60.000Re); +/-4% (10.000 - 60.000Re)
Wiederholbarkeit	+/-1 % (>60.000Re); +/-3% (10.000 - 60.000Re)
Turndown	bis zu 10:1
Ansprechzeit	20...50 s
Ex-Zonen	ATEX/IECEx Zone 1,2, FM Class I / Div 2

## 2.2 DRUCKLUFT-DURCHFLUSSMESSUNG

Druckluft ist zumeist einer der teuersten Energieträger in der Industrie. Es werden verschiedenste Methoden angewandt, um energiesparende Druckluftsysteme zu entwerfen, Energieverluste zu reduzieren und den Energieverbrauch zu minimieren. Nur etwa 10 % bis 30 % der produzierten Druckluft erreichen den Ort der endgültigen Verwendung. Dieser Verlust ist zumeist auf ungewollte Leckagen im Druckluftnetz zurückzuführen, welche durch Verschleiß der Anlagen zustande kommen (Dindorf 2012).

Mit Hilfe einer Online-Durchflussmessung können die Leckagen sofort erkannt werden. Durch die Definition relevanter Messpunkte lässt sich das Leck einfach lokalisieren (Saidur et al. 2010).

Die Messung des Druckluftdurchflusses gibt unmittelbar Aufschluss über den Verbrauch und ist langfristig wichtig, um die Energiebilanz im Unternehmen zu optimieren. Die Verwendung des Ult-

raschmessverfahrens stellt dafür eine ideale Lösung dar, da die Messung nicht-invasiv erfolgt, eine hohe Genauigkeit aufweist und flexibel an örtliche Gegebenheiten angepasst werden kann (Ilko et al. 2018).

Die Messung erfolgt wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt nach der Laufzeitdifferenzmethode, und kann stationär verbaut oder portabel als „Handheld-Lösung“ realisiert werden.

### 2.3 MESSUNG DER THERMISCHEN ENERGIE

Um Ziele im Bereich der Energieeffizienz und der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zu erfüllen, müssen sich Gebäudebetreiber verstärkt auf die Effizienz der Heiz- und Kühlprozesse konzentrieren. Die ständige Überwachung der Energiekreisläufe ist ein wesentlicher Faktor, um Optimierungspotenziale erkennen und Maßnahmen bewerten zu können. Clamp-On-Ultraschallmessgeräte, die genau diesem Zweck dienen, werden mit geringstem Zeitaufwand installiert, ohne dass es erforderlich ist, die Heiz- oder Kühlsysteme abzuschalten oder zu entleeren. Das macht sie ideal, um in bestehenden Gebäuden Überwachungssysteme nachzurüsten bzw. zu erweitern (Blesl 2018).

Auch für Neuanlagen stellt die Ultraschallmessmethode eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Einbauzählern dar, nicht zuletzt aufgrund der Möglichkeit bereits kleinste Durchflussmengen ab Strömungsgeschwindigkeiten von 0,01 m/s zu erfassen. Zusätzlich werden FLEXIM Messgeräte werkseitig, rückführbar auf nationale und internationale Normen kalibriert und erreichen eine Messunsicherheit von 0,3 % am Kalibrierstand, was einer Messunsicherheit von 1 % im Feld entspricht (FLEXIM 2022b).

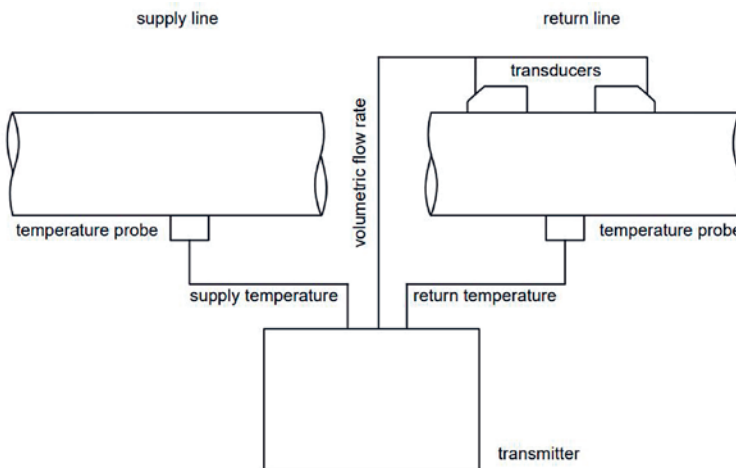


Abb. 5: Typischer Messaufbau für Energiemessungen (FLEXIM 2022b)

Auch für Energiemengenmessungen (Abb. 5) misst das Messsystem den Volumenstrom des Mediums nichtinvasiv mittels der Laufzeitdifferenzmethode. Temperaturfühler (PT100/PT1000) werden ebenso wie die Durchflusssensoren am Messumformer angeschlossen und messen gleichzeitig die Temperaturen an der Vorlauf- und Rücklaufleitung. Der gemessene Temperaturunterschied wird mit dem gemessenen Volumenstrom verrechnet und basierend auf physikalischen Parametern des Fluids (Enthalpie-Daten) wird die Heiz- oder Kühlleistung berechnet (FLEXIM 2022b).

### 2.4 TEMPERATURMESSUNG MIT ULTRASCHALL

Neben der Durchflussmessung ist es mit der Ultraschall-Laufzeitdifferenz-Messmethode auch möglich Eigenschaften wie Dichte, Konzentration oder Temperatur eines Mediums zu errechnen. Jedes Medium

besitzt für jede Konzentration und Temperatur eine spezifische Schallgeschwindigkeit, die als Kurve im Messumformer hinterlegt ist. Die Kurve für Süßwasser sieht beispielsweise so aus, wie in der Abb. 6 dargestellt, wobei auf der x-Achse die Temperatur und auf der y-Achse die Schallgeschwindigkeit abzulesen ist (NIST Chemistry Webbook 2023).

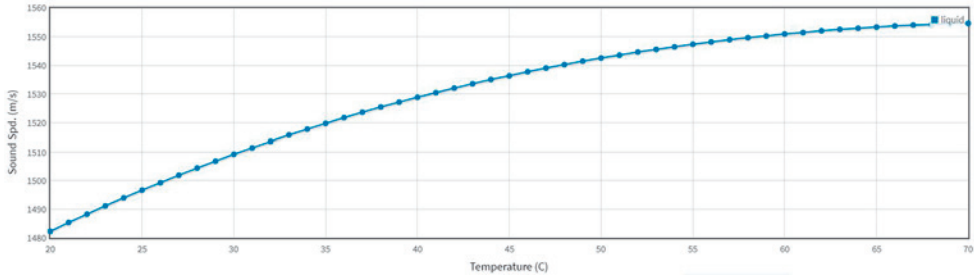


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit von Wasser (NIST Chemistry Webbook 2023)

FLEXIM-Messumformer geben neben der eigentlich gewünschten Messgröße (Volumen-, Masse-, oder Energiestrom) auch die gemessene Schallgeschwindigkeit aus. Anhand dieser kann durch Anwendung der Kurve die Temperatur des Süßwassers mit einer Messunsicherheit von  $0,2^{\circ}\text{K}$  bestimmt und ebenso ausgegeben werden. Die Überwachung der Temperatur in Trinkwassernetzen ist somit neben der Volumenstrommessung mit jedem FLEXIM-Messgerät der Wasserserie serienmäßig und ohne Aufpreis gegeben (FLEXIM 2023a).

### 3 ZUSAMMENFASSUNG

Nichtinvasive Messverfahren zeichnen sich durch die schnelle und einfache Montage am Rohr, während des laufenden Betriebs aus und erfassen ohne Eingriff in die Rohrleitung Dampf-, Gas- und Flüssigkeitsmengen. Zusätzlich können durch Verrechnung der Vor- und Rücklaufemperatur die Energiemengen von Heiz- und Kühlkreisläufen errechnet werden.

Neben Durchfluss- bzw. Energiemengenmessungen sind auch Medieneigenschaften wie Dichte, Konzentration oder Temperatur von gewissen Medien anhand der gemessenen Schallgeschwindigkeit bestimmbar. So ist es beispielsweise möglich, neben dem Durchflusswert auch die Temperatur von Süßwasser mit ein und demselben Messgerät auszugeben.

Alle Messapplikationen können mit portablen, akkubetriebenen Geräten, aber auch mit stationären ins Prozessleitsystem eingebundenen Messumformern ausgestattet werden. Das bedeutet zusammen mit dem breiten Spektrum an Sensoren für unterschiedlichste Rohrdimensionen und -materialien, höchstmögliche Flexibilität in Bezug auf Auswahl und Änderung von Messstellen.

### LITERATUR

- Akahane H., Asano H., Ibi M., Ichimura S., Murakawa H., Sugimoto K., Taira H., Umezawa S. (2021) Messung von Dampfdurchflüssen mit einem Clamp-On-Ultraschall-Durchflussmesser mit verschiedenen Nassanteilen. In: Durchflussmessung und -instrumentierung, Jahrgang 80, Artikel 101997. Amsterdam; Niederlande: Elsevier.
- Berling B., Heinrich B., Thrun W., Vogt W. (2009) Messen-Steuern-Regeln – Elemente der Automatisierungstechnik. 8., überarb. u. erg. Aufl. 2005. 2., korr. Nachdruck 2009. Wiesbaden; Deutschland: Vieweg+Teubner Verlag.

- Blesl M., Kessler A. (2018) Energieeffizienz in der Industrie, 2. Auflage. Heidelberg; Deutschland: Springer Vieweg Berlin.
- Dindorf R. (2012) Estimating potential energy savings in compressed air systems. In: *Procedia Engineering*, Vol. 39, S. 204-211. Amsterdam; Niederlande: Elsevier.
- FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH (2022a) FLUXUS G532ST-LT Technische Spezifikationen. [online, 11.4.2023] [https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-12/TSFLUXUS\\_G532ST-LTV1-0DE\\_Leu.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-12/TSFLUXUS_G532ST-LTV1-0DE_Leu.pdf)
- FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH (2022b) FLUXUS F601 Technische Spezifikationen. [online, 11.4.2023] [https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS\\_F601V2-4-3EN\\_Leu.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS_F601V2-4-3EN_Leu.pdf)
- FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH (2022c) FLUXUS G722-ST HT Technische Spezifikationen. [online, 11.4.2023] [https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS\\_G722ST-HTV2-8-1DE\\_Leu.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2022-07/TSFLUXUS_G722ST-HTV2-8-1DE_Leu.pdf)
- FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH (2023a) FLUXUS F532WD Technische Spezifikationen. [online, 11.4.2023] [https://www.flexim.com/sites/default/files/2023-01/TSFLUXUS\\_F532WDV1-0DE\\_Leu.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2023-01/TSFLUXUS_F532WDV1-0DE_Leu.pdf)
- FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH (2023b) Produktübersicht. [online, 13.4.2023] [https://www.flexim.com/sites/default/files/2023-03/BUPOVV1-1DE\\_web\\_0.pdf](https://www.flexim.com/sites/default/files/2023-03/BUPOVV1-1DE_web_0.pdf)
- Ilko J., Rusko M., Kollar V. (2018) Measurement of compressed air flow in the production technology for the purpose of leak detection in the air distribution systems using ultrasonic flowmeter. In: METES 2018. Motivation - Education - Trust - Environment - Safety 2018. Begutachtete Sammlung aus der 3. internationalen wissenschaftlichen Konferenz, 19.04.2018, Bratislava., S. 139-142. Bratislava; Slowakei.
- NIST Chemistry WebBook (2023) National Institute of standards and technology. [online, 11.4.2023] [https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?P=1&TLow=20&THigh=70&TInc=1&Applet=on&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=IsoBar&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa\\*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF](https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?P=1&TLow=20&THigh=70&TInc=1&Applet=on&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=IsoBar&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF)
- Saidur R., Rahim N. A., Hasanuzzaman, M. (2010) A review on compressed - air energy use and energy savings. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 4, S. 1135-1153. Amsterdam; Niederlande: Elsevier.



# Session 4b

## Quartiere der Zukunft

**Optimierung und Analyse von  
Warmwasserbereitungskonzepten in Kombination mit  
Kühlanwendungen von Wohngebäuden am Beispiel eines  
Studentenwohnheims**

Wessner / AEE-INTEC / AT

**Why is good indoor air quality needed in residential  
buildings?**

Strenk, Straková / TU Bratislava / SK

**Working environment discomfort and its effect on workers  
performance**

Állóová, Straková / TU Bratislava / SK



# Optimierung und Analyse von Warmwasserbereitungskonzepten in Kombination mit Kühlanwendungen von Wohngebäuden am Beispiel eines Studentenwohnheims

A. Wessner

*In Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich*

**ABSTRACT:** Climate crisis is one of the biggest challenges for the whole world that need to be solved immediately. The number of hot days has risen fast in Europe and especially in the big cities over the past 20 years. This is due to an increase in the need for cooling solutions for buildings. In order to use synergy effects, it would be interesting to use waste heat from cooling systems energetically during the cooling period. A possible consumer of this free energy is the hot water production, which is demanded over the whole year.

During the twelve-month reporting period between 2019 and 2020 from Statistik Austria around 11 terawatt hours of final thermal energy were used for hot water generation in Austrian households (Statistik Austria 2020). Thus, potable hot water production represents a large possible waste heat sink in Austria.

However, for efficient and sanitised hot water, temperatures of up to 60 °C are required, which usually cannot be achieved with the direct use of the waste heat from a chiller. This can be solved by so-called booster heat pumps, which can raise the waste heat temperature to an appropriate level. While hot water in Austria is often heated by using conventional heat generators such as gas boiler or direct use of electrical energy in the form of electric hot water storage tanks - especially in the summer months - there is great potential for such applications. In this paper, four concepts for heating drinking water were compared with each other from a technical and economic point of view and conclusions were drawn. Three of those concepts included booster heat pumps in different configurations.

During the evaluation process of these four concepts, it has been found out that the booster heat pumps had very high efficiencies and massive differences in terms of energy consumption compared to electric hot water storage tanks. Furthermore, the design of the whole energy system has a significant impact on the overall energy efficiency. During the optimization it could be shown that the utilization and the degree of waste heat utilization could be increased to a certain extent due to the increase of hot water consumption. The economic feasibility calculation showed that those drinking water heating concepts with booster heat pumps are characterized by the lowest operating costs.

In summary, it can be said that hot water preparation with booster heat pumps based on the use of waste heat from chillers makes sense in cases where a high hot water consumption is expected. The conclusion from this thesis is that a ratio of final cooling energy consumption to final hot water energy consumption of at least one to two must be ensured in order to enable high utilization of the heat pumps. In the case of student dormitories, such a concept recommends that the final hot water energy consumption tends to be higher than the statistical average value of 20 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) according to the Swiss Architecture and Engineering Association, to ensure cost effectiveness. Furthermore, the thermal mass of a building has an impact on the whole heating, ventilation and cooling system because it enables flexibility e.g., by shifting cooling loads.

## 1 EINLEITUNG

Aufgrund gesetzlicher Vorgaben wie der Richtlinie 6 des Österreichischen Instituts für Bautechnik, gestiegener Energiepreise sowie des Bewusstseins der Gesellschaft um nachhaltige, ressourcenschonende Lebensweise, rückt das Thema Nachhaltigkeit im Wohnbau immer stärker in den Vordergrund bei Wohnungsinteressentinnen und -interessenten. Innerhalb der Mitgliedsländer der Europäischen Union entfallen 36 % der Treibhausgasemissionen auf den Sektor Gebäude. Dieser Sektor beinhaltet die gesamten Lebenszyklusemissionen von Gebäuden, die in den Phasen Errichtung, Nutzung, Sanierung und Abbruch anfallen. (Europäische Kommission 2020)

Die Warmwasserbereitung stellt nach der Raumwärme in österreichischen Haushalten den zweitgrößten Energieverbraucher dar (Statistik Austria 2020). In Neubauten entfallen 40-60 % des Gesamtwärmenergiebedarfs auf die Warmwasserbereitung, wodurch eine energieeffiziente Bereitstellung von Warmwasser immer wichtiger für Planungsbüros, Anlagenbau- und Energie-Contracting-Unternehmen wird (Riedmann et al. 2021, S. 5). Sogenannte Booster-Wärmepumpen können hierbei für eine effiziente und hygienisch einwandfreie Warmwasserbereitung eingesetzt werden. Booster-Wärmepumpen nutzen Wärmequellen mit einem höheren Temperaturniveau als bei üblichen Wohnbauheizungs-Wärmepumpen und bewerkstelligen bei der Warmwasserbereitung eine Temperaturerhöhung von über 50 °C, um hygienisch einwandfreies Warmwasser bereitzustellen.

### 1.1 BESTANDSAUFNAHME WARMWASSERBEREITUNG IN ÖSTERREICH

Häufig erfolgt im Wohnbaubereich die Warmwasserbereitung über ein Speicher-Ladesystem, bei welchem aus Hygieneanforderungen die Warmwasserbereitung mit einer Temperatur von 60 °C zu erfolgen hat. Auch ist der Einsatz von Elektro-Trinkwasserspeichern nachwievor weit verbreitet (Kreitmayer et al. 2016, S. 9). Neben der Warmwasserbereitung mittels Speicher-Ladesystem kommen auch häufig Elektrospeicher zum Einsatz, um Warmwasser bereitzustellen. Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, wurde in den Jahren 2019 und 2020 mit einem Anteil von fast einem Drittel am Gesamtenergieeinsatz für die Warmwasserbereitung der Energieträger Strom direkt für die Trinkwassererwärmung eingesetzt.

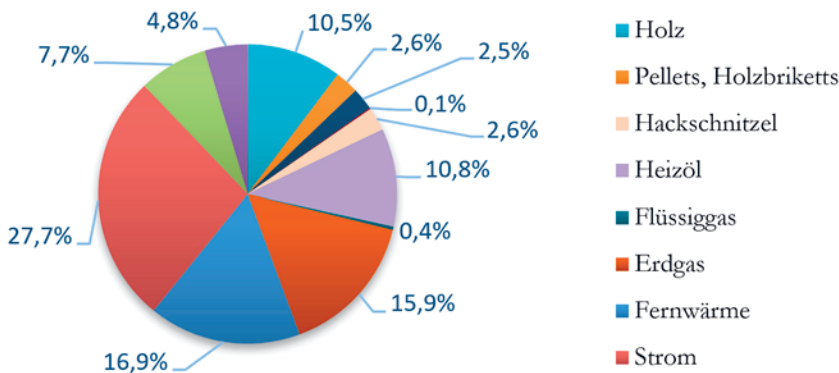


Abb. 1: Anteiliger Einsatz aller Energieträger an der Warmwasserbereitung in österreichischen Haushalten in den Jahren 2019/2020 (nach Daten von Statistik Austria 2022)

Eine direkte Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme stellt in exergetischer Hinsicht eine ungünstige Option zur Warmwasserbereitung dar. Vorteilhafter wäre hier etwa eine effizientere Nutzung, beispielsweise die Nutzung von elektrischer Energie als Antriebsenergie für einen Wärmepumpenprozess.

## 1.2 METHODIK

Anhand eines Bestandsgebäudes in Graz, welches thermisch saniert und als Studentenwohnheim zukünftig genutzt werden soll, wurde eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulation vorgenommen und vier innovative Varianten zur Warmwasserbereitung untersucht. Die Systembetrachtung erfolgte mit Hilfe einer dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation, um eine detaillierte zeitliche Auflösung der physikalischen Vorgänge abbilden zu können. Physikalische Vorgänge wie Wärmeverlustströme eines Gebäudes werden nicht nur in einem vereinfachten Fall isoliert betrachtet, sondern es wird das Gesamtsystem "Gebäude und Gebäudetechnik" analysiert. Bei drei dieser Varianten handelt es sich um innovative Konzepte, bei welchen lokale Abwärmequellen als Energiequelle genutzt werden sollen. Mithilfe von Wärmepumpen wird das Temperaturniveau angehoben, um Warmwasser hygienisch einwandfrei bereitstellen zu können. Der Übersicht halber werden an dieser Stelle diese vier Varianten vorgestellt:

- Dezentrale Warmwasserbereitung mittels vier Frischwassermodulen
- Dezentrale Warmwasserbereitung mittels vier Elektrospeicher
- Zentrale Warmwasserbereitung über eine Booster-Wärmepumpe mit Hilfe eines zentralen Warmwasserspeichers
- Dezentrale Warmwasserbereitung mittels vier Brauchwasserwärmepumpen (Wärmequelle: Rücklaufheizungsrohr der Bauteilaktivierung)

Neben der technischen Systemanalyse mithilfe der Gebäude- und Anlagensimulation wurde auch eine ökonomische Betrachtung der vier Konzepte vorgenommen, um eine ganzheitliche Betrachtung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht zu gewährleisten (Wessner 2023).

## 2 VORGABEN FÜR DEN KONZEPTVERGLEICH

### 2.1 VORGABEN FÜR DIE TECHNISCHE ANALYSE DER KONZEPTE

Die technische Betrachtung der vier Konzepte zur Trinkwassererwärmung wurde mithilfe einer dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation im Simulationsprogramm IDA ICE vorgenommen.

Hierfür musste vorab ein Gebäudemodell des zu betrachteten Studentenwohnheims in IDA ICE implementiert werden. Bei diesem handelt es sich um ein zehnstöckiges Gebäude mit einer thermisch aktivierten Fassade. Hierfür wurden Kunststoffrohrleitungen an den massiven Außenwandstahlbetonwänden angebracht und darauf aufsetzend wurde das Wärmedämmverbundsystem angebracht.

Im Zuge der thermischen Sanierung des Bestandsgebäudes in Graz wurde auch eine raumlufttechnische Anlage für eine kontrollierte Be- und Entlüftung der Studentenwohnungen installiert, welche mit einem Vorheiz- und Kühlregister sowie einer Wärmerückgewinnung zur Konditionierung der Zuluft ausgestattet ist. Die Sollwerttemperatur der Zuluft liegt ganzjährig bei 22 °C.

Vor Durchführung der Simulation mussten Randbedingungen, wie etwa die Festlegung des Warmwassernutzenergieverbrauches, gesetzt werden. Diese Randbedingungen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Randbedingungen für die Simulation

Eckdaten	Beschreibung / Kennzahl
Konditionierte Nettogebäudefläche	Ca. 920 m <sup>2</sup> (Studentenwohnheim)
Simulationszeitraum	1. Mai bis 30. September
Sollwerttemperatur Wohnräume im Sommer	25 °C
Kühlenergiebedarf des Gebäudes (nur Studententrakt) im Simulationszeitraum	29.000 kWh
Warmwasserverbrauch	413 m <sup>3</sup> /a (bzw. je Wohnung: 17,2 m <sup>3</sup> /a)
Jährlicher Warmwasserenergieverbrauch (lt. SIA bzw. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein)	24.000 kWh/a bzw. 20 kWh/(m <sup>2</sup> a) (Schweizer Architekten- und Ingenieurverein, 2016)
Warmwasserenergieverbrauch des Gebäudes (nur Studententrakt und ohne Verteilverluste) im Simulationszeitraum	9.700 kWh
Kaltwassertemperatur (konstante Zulauftemperatur)	15 °C

Der in der Tab. 1 angegebene Kühlenergiebedarf wurde einer in IDA ICE durchgeführten dynamischen Gebäudesimulation entnommen.

Wie aus Tab. 1 zu entnehmen ist, wurde für die Festlegung des Warmwasserenergieverbrauchs auf Daten des Schweizer Ingenieur- und Architektenvereins, kurz SIA, zurückgegriffen. Der angeführte spezifische Warmwasserenergieverbrauch von 20 kWh/(m<sup>2</sup>a) wurde dem SIA Merkblatt 2024 entnommen, wobei dieser Wert nur für Mehrfamilienhäuser und Gebäude mit überwiegender Wohnnutzung wie etwa ein Studentenwohnheim repräsentativ ist.

## 2.2 VORGABEN FÜR DIE ÖKONOMISCHE ANALYSE DER KONZEPTE

Der ökonomische Vergleich der vier Konzepte basierte auf der ÖNORM M 7140:2014. Der Betrachtungszeitraum wurde mit 15 Jahren angesetzt. Als jährlichen Betrachtungszeitraum wurde analog zur Anlagensimulation der Zeitraum 1. Mai bis 30. September angesetzt, da für diesen Zeitraum der Energieverbrauch aufgrund der Ergebnisse der Anlagensimulation bekannt waren. Der kalkulatorische Zinssatz, welcher den Zinswert eines Fremdfinanzierungszinssatzes entspricht, wurde mit drei Prozent festgelegt.

Aufgrund stark gestiegener Energiepreise zum Zeitpunkt der Ergebnisauswertung wurde festgelegt, dass für die Durchführung des ökonomischen Vergleichs im ersten Schritt die Investitionskosten und laufenden Kosten der Variante 2 ermittelt werden. Basierend auf dem Gesamtbarwert nach 15 Jahren kann dann im nächsten Schritt für die anderen Konzepte auf maximal mögliche Investitionskosten zurückgerechnet werden.

## 3 ERGEBNISSE DER KONZEPTVERGLEICHE

### 3.1 ERGEBNISSE DER TECHNISCHEN ANALYSE DER KONZEPTE

Um aussagekräftige Visualisierungen der Simulationsergebnisse zu erhalten, wurde der Energieverbrauch je Liter Warmwasser für jede der vier Konzepte zur Warmwasserbereitung ermittelt. Der spezifische elektrische Endenergieverbrauch und Primärenergieverbrauch bezogen auf verbrauchtes Warmwasser sind in Abb. 2 dargestellt.

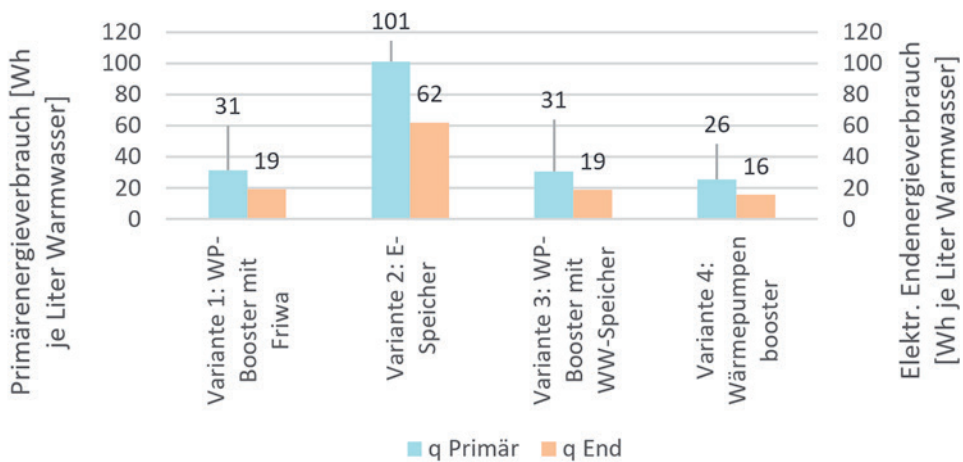


Abb. 2: Spezifischer End- und Primärenergieverbrauch je verbrauchten Liter Warmwasser

Für die Ermittlung des elektrischen End- und Primärenergieverbrauches wurden die Ergebnisse auf eine Warmwasserendtemperatur von 60 °C referenziert.

Unter allen in Abb. 2 aufgeschlüsselten Varianten war bei der Variante 2 der elektrische Endenergieverbrauch und der Primärenergieverbrauch am höchsten. Die Auswertung zeigte, dass für das betrachtete Objekt mit Nutzung als Studentenwohnheim eine direkte elektrische Warmwasserbereitung mittels Elektrospeicher mit hohem Energieverbrauch verbunden ist.

Als Argument für Elektrospeicher bzw. allgemein für dezentrale Warmwasserbereiter spricht jedoch, dass diese keine bzw. kaum Bereitschaftsverluste aufweisen. Darunter fallen etwa Zirkulationswärmeverluste bei zentralen Warmwasserbereitstellungssystemen, welche die Energiebilanz signifikant verschlechtern. Wie aus Abb. 2 hervorgeht, führten vor allem bei Variante 1 und 3 hauptsächlich die Wärmeverluste der Verteilungen zu einem höheren spezifischen End- und Primärenergieverbrauch im Vergleich zu Variante 4.

### 3.2 ERGEBNISSE DER ÖKONOMISCHEN ANALYSE DER KONZEPTE

Neben der technischen Analyse wurde auch eine ökonomische Betrachtung der vier Konzepte zur Warmwasserbereitung über einen Zeitraum von 15 Jahren vorgenommen. Diese zeigte, wie in Abb. 3 zu sehen ist, dass die laufenden Kosten bei der Variante 2 mit den vier dezentralen Elektro-Warmwasserspeichern sehr starke Auswirkungen auf den Gesamtbarwert haben. Elektrospeicher weisen sehr überschaubare Investitionskosten in Bezug auf Lebenszykluskosten eines Warmwasserbereiters auf.

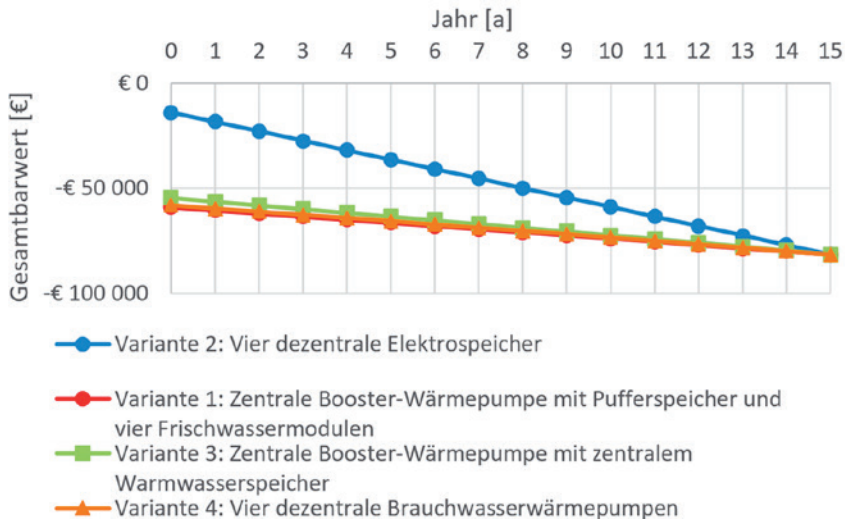


Abb. 3: Verlauf des Gesamtbarwerts für den festgelegten Betrachtungszeitraum

Die Auswertung zeigte auch, dass bei den drei Konzepten mit den Booster-Wärmepumpen Investitionskosten von bis zu 58.000 € gerechtfertigt wären, um nach 15 Jahren einen finanziellen Gleichstand zur Variante mit den Elektrospeichern hervorzurufen.

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit vier unterschiedlichen Konzepten zur Warmwasserbereitung für ein Studentenwohnheim, wobei sich drei dieser Konzepte durch innovative Ansätze von herkömmlichen in der Praxis häufig anzufindenden Varianten unterscheiden. Die Nutzung von Abwärme einer Kältemaschine stellt eine interessante und sich regenerierende Wärmequelle mit hohen Quelltemperaturen für Booster-Wärmepumpen dar.

Es konnte gezeigt werden, dass die Varianten mit Booster-Wärmepumpen sehr optimale Kennzahlen hinsichtlich des Energieverbrauches und der damit verbundenen laufenden Kosten für Energie lieferten. Dem gegenüber musste jedoch ernüchternd festgestellt werden, dass nicht nur das System Wärmepumpe isoliert betrachtet werden kann, sondern immer das Gesamtsystem. Wesentlich für die Gesamtenergieeffizienz bei der Warmwasserbereitung sind nämlich nicht nur die Arbeitszahl einer Wärmepumpe, sondern auch die Berücksichtigung von Wärmeverlusten im Gesamtsystem wie etwa Zirkulationswärmeverluste, welche die Energiebilanz deutlich verschlechtern.

#### LITERATUR

- Europäische Kommission (2020) Energieeffizienz von Gebäuden. Brüssel, Belgien. Europäische Kommission, Dienststelle Energie. Abgerufen am 10. April 2023 um 11:21 Uhr: [https://commission.europa.eu/system/files/2020-03/in\\_focus\\_energy\\_efficiency\\_in\\_buildings\\_de.pdf](https://commission.europa.eu/system/files/2020-03/in_focus_energy_efficiency_in_buildings_de.pdf)
- Kreitmayer, T.; Groth, F.; Rohrer, N. & Höller, M. (2016) Warmwasser! effizient bereitstellen. Technologieleitfaden Warmwasser, Magistratsabteilung 20 - Energieplanung, Wien

- Riedmann, A.; Moritz, G.; Schlader, W.; Greml, A.; Haftner, P.; Holzer, P. (2021) klimaaktiv Ratgeber - Warmwasser für Ein- und Zweifamilienhäuser, Wien. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Abgerufen am 10. April 2023 um 17:35 Uhr: [https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:d8258c51-9b0b-40b0-9ec8-b96a658d46f7/Ratgeber-Warmwasser\\_final2.pdf](https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:d8258c51-9b0b-40b0-9ec8-b96a658d46f7/Ratgeber-Warmwasser_final2.pdf)
- Statistik Austria (2020) Einsatz aller Energieträger nach Verwendungszwecken, Wien. Daten veröffentlicht am 10. Juni 2020. Abgerufen am 10. April 2023 um 20:35 Uhr: <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energieeinsatz-der-haushalte>
- Wessner, A. (2023) Optimierung und Analyse von Warmwasserbereitungskonzepten in Kombination mit Kühlanwendungen von Wohngebäuden am Beispiel eines Studentenwohnheims, Masterarbeit an der Fachhochschule Burgenland GmbH, Standort Pinkafeld



# Why is good indoor air quality needed in residential buildings?

T. Strenk, Z. Straková

*Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, Slovakia*

**ABSTRACT:** Indoor air pollution is a significant factor contributing to chronic diseases, as people spend more than 70% of their time indoors. This study aimed to measure indoor air quality in a non-insulated apartment building undergoing renovation in Bratislava. Using two intelligent air sensors, nine indoor air parameters were measured for seven consecutive days in the bedroom and living room/kitchen. The parameters of interest were temperature, humidity, carbon dioxide, total volatile organic compounds, and fine particulate matter. Despite residents ventilating through windows more frequently than usual, some parameters exceeded limit values, particularly in the bedroom at night. The results emphasize the need for optimal building services beyond natural ventilation to achieve the best indoor environment possible, especially during building renovations that can negatively impact indoor air quality. Further measurements in apartments with different boundary conditions would help to design building services and strategies to ensure optimal indoor air quality.

## 1 INTRODUCTION

Indoor air quality in residential buildings is crucial for human health and well-being. People spend a significant amount of time indoors, especially in their homes, where they expect a safe and healthy environment. However, indoor air can be polluted by various factors, such as household activities, building materials, and outdoor pollutants that penetrate indoor spaces. As a result, improving indoor air quality is crucial for lowering the risk of allergies, respiratory illnesses, and other health issues. (WHO Guideline 2010; EPA 2019).

Natural air exchange, which occurs through windows and doors, is the most common way to ventilate flats and residential buildings. However, its efficiency depends on various factors, such as weather conditions, building design, and occupant behavior. Inadequate ventilation can result in an increase of indoor air pollutants such as carbon dioxide, volatile organic compounds, and particulate matter, which can impair cognitive function and sleep quality (EPA 2019; Fisk 2017).

High levels of carbon dioxide, a typical indoor air contaminant, can impair cognition, make you feel sleepy, and give you headaches. In residential buildings, high carbon dioxide levels can result from poor ventilation or human activities, such as cooking or smoking. Monitoring and controlling indoor air quality is crucial to ensure a safe and healthy environment for occupants (EPA 2019; Sundell 2004).

## 2 EXPERIMENTAL MEASUREMENT

The measurements referred to in the allowance were taken at the end of the calendar year 2022 in a dwelling occupied by two adults and one child under 3 years of age. The measurements were taken over 7 consecutive calendar days.

The main objective of the measurement was to analyse the indoor environment in the living rooms and, based on the noted activities of the occupants, to determine the impact of the occupants' behaviour on the quality of the indoor environment.

## 2.1 METHODOLOGY IN TERMS OF MEASUREMENT LOCATION

Fig. 1 to 3 show the floor plan of the measured apartment with the location of the two measuring devices used in the experimental measurement. The apartment is located in an apartment building, which is partially renovated, but part of the building, in which the measured apartment is located, is formed by the original envelope structures without insulation. Only the window structures are renewed for plastic windows with double glazing.

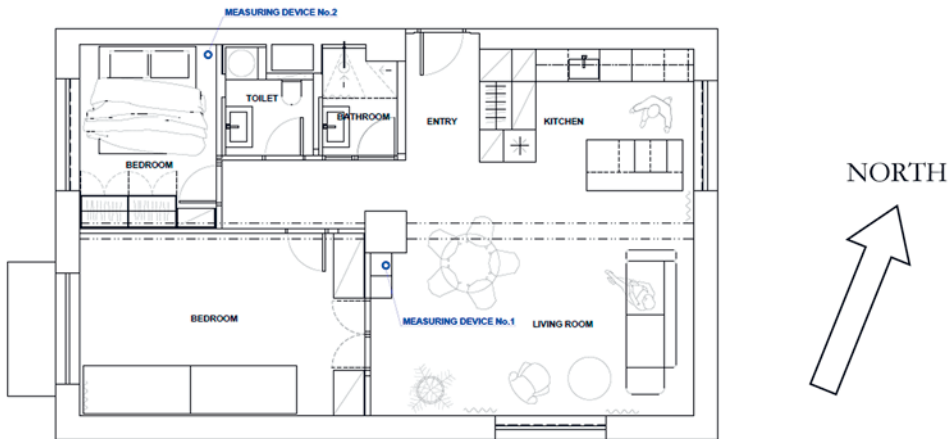


Fig. 1: The floor plan of measured apartment with location of measuring devices.

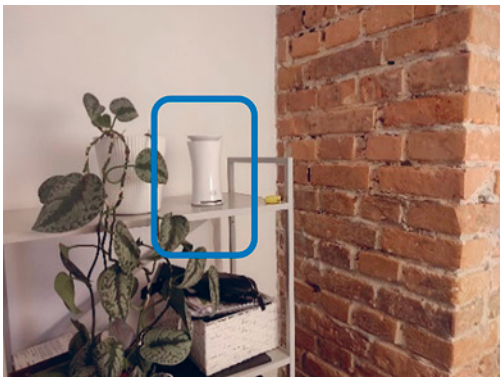


Fig. 2: The placement of device No1.



Fig. 3: The placement of device No.2.

## 2.2 METHODOLOGY IN TERMS OF MEASURING DEVICES

Uhuo smart air monitors were used to measure indoor environmental parameters and are capable of measuring a total of 9 air quality parameters. For this particular measurement presented in this paper, we analysed only the following 4 parameters:

- Indoor air temperature  $\theta_i$ ,
- Relative humidity of indoor air  $\phi_i$ ,
- Concentration of carbon dioxide,
- Concentration of total volatile organic compounds TVOCs.

Fig. 4 shows the Uhooh smart air monitor and Tab. 1 summarizes the measured parameters and the measurement accuracy of the instrument.



Fig. 4: Uhooh smart air monitor (Uhooh 2023).

Tab. 1: The measured parameters of device and accuracy of the sensors (Uhooh 2023).

Sensor	Unit	Accuracy
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	ppm	± 50 ppm plus ± 3 % of actual value*
Relative Humidity	%	± 3 %
Air temperature	°C	± 0.5 °C
Airborne Chemicals (VOCs)	ppb	± 20 ppb or ± 15 % of actual value*

\* Choose higher of the two

### 2.3 METHODOLOGY IN TERMS OF THE TIME PERIOD OF MEASUREMENT

Measurements were carried out between 13-12-2022 and 19-12-2022, a total of 7 calendar days. The Uhooh smart air monitor instruments record the measured values at a time interval of 1 minute.

### 2.4 METHODOLOGY IN TERMS OF SPACES ASSESSED

Measurements were taken in the bedroom and the living room directly connected to the kitchen and dining room. Due to the length of the paper, the north-west facing bedroom room was chosen to illustrate the results. All three occupants of the apartment sleep in this room during the night. Only natural ventilation through windows is provided throughout the apartment.

### 2.5 METHODOLOGY IN TERMS OF REQUIREMENTS FOR ASSESSED INDOOR ENVIRONMENT PARAMETERS

The parameters evaluated to assess the thermal-humidity microclimate were the operative indoor air temperature, relative humidity, carbon dioxide CO<sub>2</sub> concentration and volatile organic compounds TVOCs. The requirements for thermal-humidity microclimate were based on Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic No. 124/2017 Coll (Decree 124 2017) on details of requirements for

the indoor environment of buildings and on minimum requirements for lower standard dwellings and accommodation facilities, STN EN 16516:2018 and STN EN 16798-1:2019 on energy performance of buildings.

### 3 RESULTS

After analysing the results, we selected cooking and window ventilation as the activities that most significantly influenced the indoor environment parameters in the measured rooms. For better interpretation of the results, we selected one specific day in each room, within which the activities in the room were marked.

The measurement results for the full 7 days are interpreted as line graphs in Fig. 5 and Fig. 6. Fig. 7 shows a plot of the measured values for the bedroom with the occupants' activities marked. Fig. 8 shows a graph with the measured values for the living room with the occupants' activities marked.

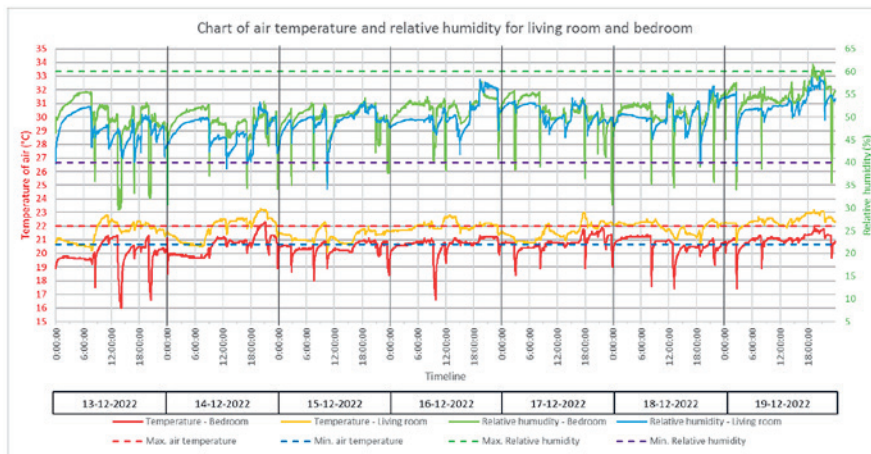


Fig. 5: Graph of air temperature and relative humidity for living room and bedroom.

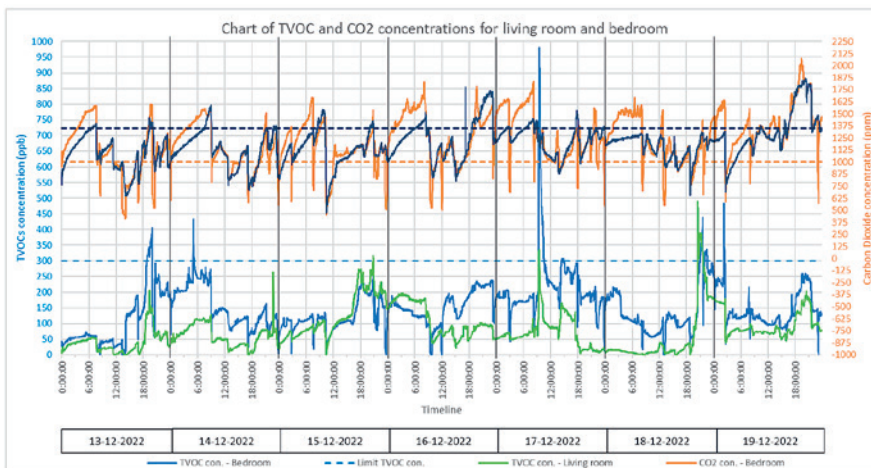


Fig. 6: Graph of TVOC concentration and  $CO_2$  concentration for living room and bedroom.

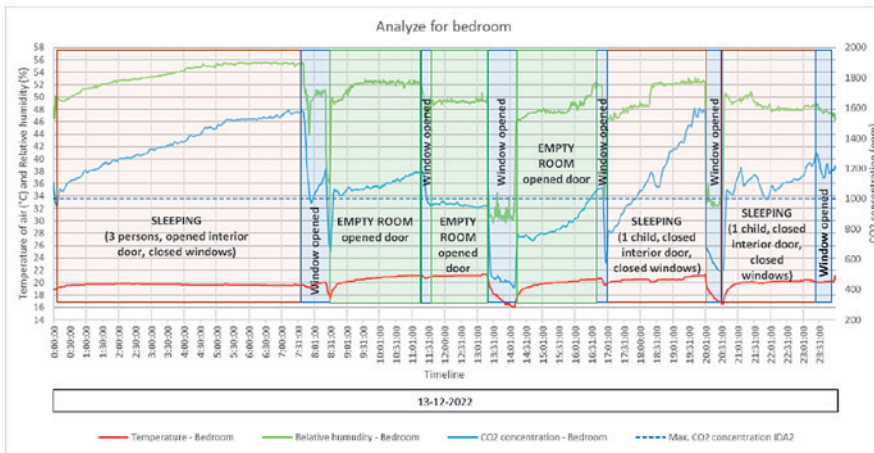


Fig. 7: Graph of analyse for the bedroom during one day including occupant's activities.

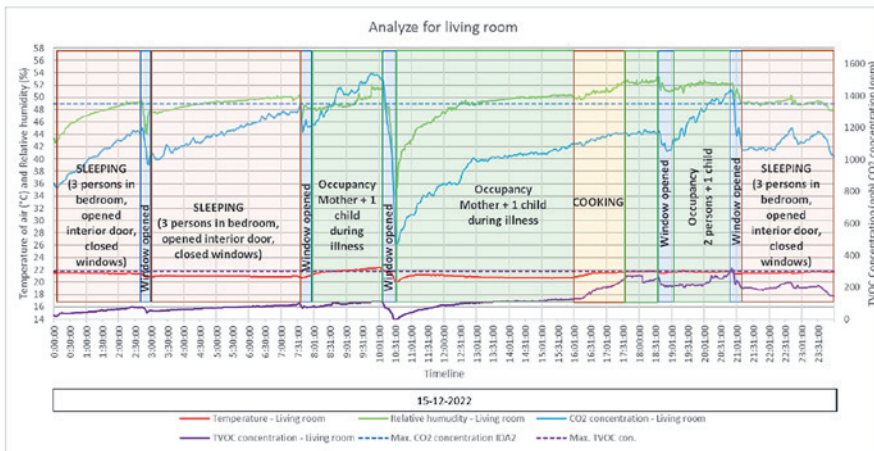


Fig. 8: Graph of analyse for the living room during one day including occupant's activities.

#### 4 DISCUSSION

On the basis of the measured values, it can be concluded that the inhabitants of the assessed premises themselves influence the state of the indoor environment to the greatest extent. The indoor air temperature was within the optimum range for most of the measurement period. In the bedroom where the occupants were sleeping, the air temperature was lower than the minimum optimum temperature according to Decree No. 259/2008 Coll. The indoor air temperature in the bedroom is a subjective parameter and it depends on the occupants themselves what temperature is optimal for them.

Relative humidity during measurements within the permissible range most of the time. At certain moments the relative humidity dropped below the limit value, which may be related to the low relative humidity of the outside air in the cold season. Also, the more pronounced drying of the air may be due

to excessive space heating after ventilation of the polluted air, when there is a significant reduction in the air temperature in the cold season.

The concentration of carbon dioxide is very often measured to be above the limit values set by EN 16 798-1:2019, despite the fact that the occupants of the dwelling ventilated using the windows quite frequently. As can be seen from the parameter waveforms, ventilation through windows reduces the carbon dioxide concentration, but in the cold season it also causes a rapid decrease in temperature and draughts, therefore it is not possible to ventilate through windows as often as would be necessary in the cold season. Window ventilation in the cold season does reduce carbon dioxide concentrations, but often not effectively enough.

Volatile organic compounds, or VOCs, are organic chemicals that become gases at room temperature and are the main source of air pollution at ground level. Volatile organic compounds (VOCs) are organic emissions from products we use every day. When determining them, it is quite difficult to determine which substances are polluting the area at any given time. Air quality measurements in cooking rooms show an increase in the concentration of VOCs produced by cooking fumes. It is important to ventilate such rooms effectively to avoid excessive concentrations of VOCs in the air, which could cause odours and breathing discomfort.

## 5 CONCLUSION

In conclusion, the results of the indoor air quality measurements conducted in the apartment highlight the importance of assessing the quality of indoor air. By measuring temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, and TVOC concentration, we were able to gain insight into the levels of these parameters in the living room and bedroom of the apartment. Additionally, by noting the occupants' activities during the measurement period, we were able to determine the impact of those activities on indoor air quality.

To address this issue, we conducted a study on the indoor air quality in an apartment building in Bratislava. We measured nine indoor air quality parameters, including temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, and total volatile organic compounds concentration, using two intelligent air sensors placed in the living room and bedroom. During the measurement period of seven days, we observed the residents' basic activities that could impact indoor air quality, such as opening windows and cooking.

It is fact that while natural ventilation through windows can improve indoor air quality, it is not efficient method, especially during cold season. This can lead to a decrease in indoor air temperature and may not be as effective for creating a good indoor air quality.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic through VEGA grant 1/0303/21 and KEGA project 005/STU-4/2021.

## LITERATURE

- Decree 124 (2017) Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic No. 124/2017 Coll. amending Decree No 259/2008 Coll. of the Ministry of Health of the Slovak Republic)
- Decree 259 (2008) Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic No. 259/2008 Coll. on details of requirements for the internal environment of buildings and on minimum requirements for lower standard apartments and accommodation facilities. 2008.
- EPA (2019) Indoor air quality (IAQ). Retrieved from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq>
- Fisk W. J. (2017) Health benefits of particle filtration. *Indoor Air*, 27(1), 6-19.

STN EN 16516:2018 - Building products. Assessment of release of hazardous substances. Determination of emissions to indoor air. 2018.

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). 2019.

Sundell J. (2004) On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(Suppl 7), 51-58.

WHO Guideline (2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe.

Contact:

Tomas Strenk

Slovak University of Technology in Bratislava

Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services

Radlinského 2766/11

810 05 Bratislava, Slovakia

+421 908 694 501

tomas.strenk@stuba.sk

www.svf.stuba.sk/ktzb



# Working environment discomfort and its effect on workers performance

V. Állóová, Z. Straková

*Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services, Radlinského 2766/11 Bratislava 810 05, Slovakia, viktorina.alloova@stuba.sk*

**ABSTRACT:** Numerous research papers assessing indoor air quality focus on human comfort in residential buildings, or non-residential buildings, such as administrative, educational and other facilities. People on average spend 30% of their life in work, where suitable working environment must be ensured in order to achieve desired performance. Workers in industrial buildings are more likely to be exposed to temperature fluctuations and air draught, which leads to discomfort and possibly lack of work performance or attention deficit resulting in injuries and accidents. The indoor air quality can be negatively affected by heat gains from machinery, repetitive opening and closing of industrial overhead doors, inadequate ventilation or heating system design etc. Worker satisfaction and working performance are closely related. In this study, an experimental survey was done, focusing on the impact of the indoor air quality on workers performance.

## 1 INTRODUCTION

The research was carried out in an assembly hall, industrial building with cold-type operation, where employees perform light manual work in standing position during working hours. The workers are assigned to do a certain amount of work in a given quantity, therefore their performance cannot be evaluated in terms of the quantity of products assembled. Hence, we have focused on evaluating working performance in terms of time spent on active work and time on breaks, the frequency and length of which are not limited by the employer. Measurements of indoor air temperature, operative temperature, relative humidity, air velocity and concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) were made in order to get an overview of the indoor air quality under standard operating conditions. During the second stage of the observation the indoor air quality of the working environment was intentionally altered in such a way to cause the workers experience discomfort. During both investigated working environment conditions, the activity of the workers was monitored, as well as the indoor air quality. The workers were unaware of the ongoing research, so that their evaluation is not influenced. At the beginning of the second stage, the workers filled out a questionnaire on the subjective assessment of thermal comfort.

## 2 MEASUREMENTS AND QUESTIONNAIRE

In order to evaluate the indoor air quality (IAQ), measurements were made of the thermal parameters of the indoor air and a thermal comfort survey was done.

### 2.1 MEASURING DEVICES

Testo 400 - Universal Air Flow and IAQ Instrument (Fig. 1 A) is multifunctional air flow and IAQ (indoor air quality) device that can measure a wide range of parameters including temperature, humidity, air velocity, air volume flow, CO<sub>2</sub>, and many others. The following measuring devices are designed to be used with this device, which also works as a datalogger. All of these devices were attached to the Measuring tripod for IAQ and comfort level measurements (Fig. 1 B):

Testo CO<sub>2</sub> probe (digital) - with Bluetooth® including temperature and humidity sensor (Fig. 1 C) is a digital sensor that measures the concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the air, as well as the temperature and humidity. The measurement range for CO<sub>2</sub> is 0 to 10.000 ppm (parts per million), while the temperature range is 0 to 50 °C and the humidity range is 5 to 95% RH. The accuracy of the measurements is within  $\pm 50$  ppm for CO<sub>2</sub>,  $\pm 0,5$  °C for temperature, and  $\pm 2\%$  RH for humidity. The Testo CO<sub>2</sub> probe has a resolution of 1 ppm for CO<sub>2</sub>, 0,1 °C for temperature, and 0,1% RH for humidity.

The Testo Turbulence probe (Fig. 1 D) is designed to measure air velocity and turbulence intensity in HVAC systems and indoor environments. It has a measurement range of 0 to 30 m/s for air velocity and the accuracy is  $\pm(0,1 \text{ m/s} + 1,5\% \text{ of mv})$ . The resolution for measurements is 0,01 m/s.

The Testo Globe Probe (Fig. 1 E) is designed to measure the globe temperature, which is an important parameter for evaluating the thermal comfort of indoor environments. The probe has a measurement range of -40 to 70 °C and an accuracy of  $\pm 0,2$  °C. The resolution of the probe is 0,1 °C.



*Fig. 1: Measuring equipment for climate-related parameters A) Testo 400 - Universal Air Flow and IAQ Instrument, B) Measuring tripod, C) Testo CO<sub>2</sub> probe including temperature and humidity sensor, D) Testo Turbulence probe, E) Testo Globe Probe*

## 2.2 PLACEMENT

The study was conducted in an industrial building located in Dunajská Streda, Slovakia. This building was constructed in 2010 and is comprised of steel support columns and sandwich panels. The building's design incorporates skylights at the highest point of the roof to allow for natural daylight and ventilation. The building's total area is 4100 m<sup>2</sup> and has an average clear ceiling height of 7,35 meters, resulting in a total volume of indoor air of 30.135 m<sup>3</sup>. The measuring equipment was set up on a tripod in the center of the hall, as portrayed in the blueprint shown in Fig. 2. The figure also shows the working areas of the workers being monitored in part 2.

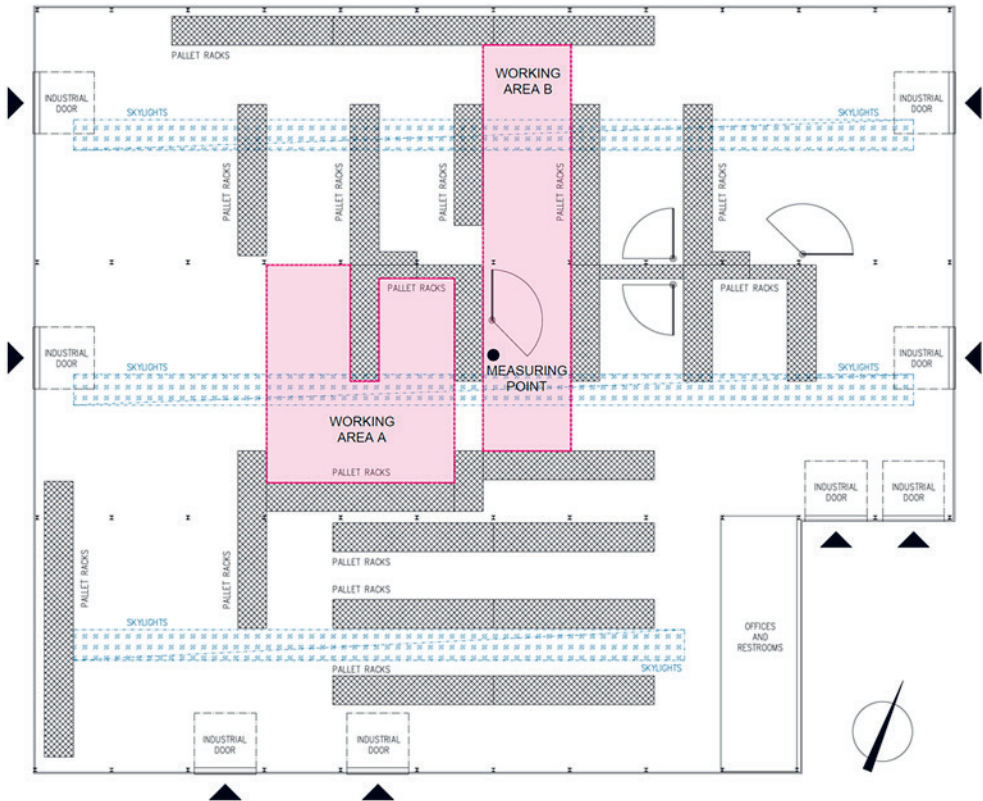


Fig. 2: Blueprint of the assembly hall with marked working areas

### 2.3 REQUIREMENTS ON THERMAL COMFORT

The Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic No. 259/2008 Coll. sets the requirements for the hygienic assessment of the indoor environment in buildings, including thermal comfort. The decree applies to all types of buildings, including residential, commercial, and public buildings, and sets the criteria for evaluating the indoor environment's impact on human health and well-being. Furthermore, it sets the criteria for evaluating the indoor environment's impact on human health, such as assessing the risk of exposure to indoor air pollutants, including volatile organic compounds, particulate matter, and radon. The decree also provides guidance on the frequency and methods of measuring the indoor environment's parameters to ensure compliance with the applicable regulations and standards. Tab. 1 shows the requirements on optimal and permissible conditions of indoor air for warm and cold season based on the decree listed above.

Tab. 1: Optimal and permissible conditions of indoor air for warm and cold season

Class of activity	Warm season				Cold season			
	Operative temperature (°C)			Air velocity (m/s)	Operative temperature (°C)			Air velocity (m/s)
	Optimal	Min	Max		Optimal	Min.	Max.	
0	25-28	20	29	≤ 0,2	22-26	20	27	≤ 0,2
1a	23-27	20	28	≤ 0,25	20-24	20	26	≤ 0,2
1b	22-25	19	27	≤ 0,3	18-21	18	24	≤ 0,25
<b>1c</b>	<b>20-24</b>	<b>17</b>	<b>26</b>	<b>≤ 0,3</b>	<b>15-20</b>	<b>15</b>	<b>22</b>	<b>≤ 0,3</b>
<b>2a</b>	<b>18-21</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>0,1-0,3</b>	<b>13-18</b>	<b>13</b>	<b>20</b>	<b>≤ 0,3</b>
2b	17-20	12	25	0,1-0,3	12-16	12	20	≤ 0,3
3	N/S	10	N/S	0,1-0,5	N/S	10	N/S	≤ 0,5
4	N/S	10	N/S	0,1-0,5	N/S	10	N/S	≤ 0,5

Required relative humidity for both seasons and all of the classes of activity is 30-70%

#### 2.4 MEASURED DATA

Between April 2 and April 14, 2023, data on thermal comfort was collected every 5 minutes using various instruments listed above. The building is normally occupied by workers between 6:00 and 16:00. Graphs representing an average day of the 4 days per stage were presented in the article. The temperature was measured in three different heights according to the requirements in STN EN ISO 7726, ankle height (0,1m), hips height for a standing person (1,1 m) and head height of a standing person (1,7 m). The air velocity was monitored at hips and head height. The requirements highlighted in Tab. 2 must be met based on the class of activity during work, that means temperature of 13-20 °C and air velocity ≤0,3 m/s during cold season and temperature of 18-24 °C and air velocity of 0,1-0,3 m/s during warm season. The outdoor temperature is not shown in the graphs because regardless the outdoor environmental factors, the indoor air parameters listed in part Tab. 2 must be met. The data collected during the measurement period complied with the required values.

The first graph (Fig. 3) shows the measured values of thermal comfort on the first day of the first stage of this study. The heating was on with the desired temperature of the air of 18 °C because the outdoor temperature reached 0°C in the mornings. The indoor air temperature increased between 10:00 and 16:00 due to heat gains through the roof and outer walls of the building. As shown, the air velocity fluctuates throughout the day, which can cause discomfort.

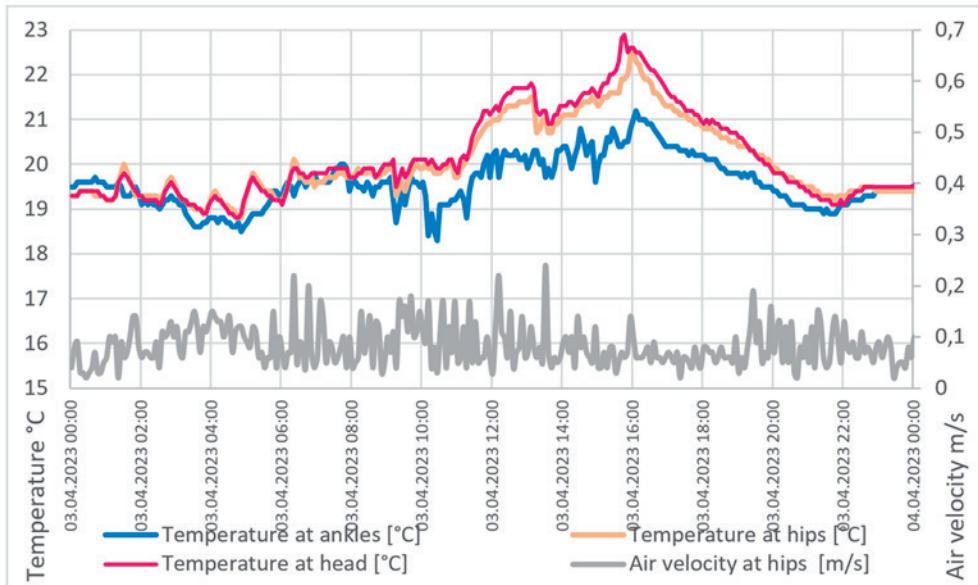


Fig. 3: Measurements on thermal comfort during stage 1

In the second stage of observation, a similar graph to the first stage was produced in Fig. 4, showing the measured parameters of the indoor air. This graph represents the first day of the second stage, during which questionnaires were conducted to create air draught and sudden changes in temperature. The workers completed the questionnaires at 11:00, right after the sudden drop in temperature. Interestingly, the air velocity did not show any sudden changes, but the workers still experienced discomfort. The temperature was still within the optimal range for cold season but had reached the minimum range for warm season. Notably, the temperature at ankle height was higher during this time compared to the temperature at hip and head height. This phenomenon occurred due to the air draught, where the cold air was flowing from the western part of the building. As the skylights were open, where the cold air from the lower part of the building was drawn towards the roof due to the pressure difference caused by the cold air sinking and the warm air rising. The difference in pressure occurs due to the temperature difference between the indoor and outdoor air, as well as the wind pressure. As warm air rises, it creates a positive pressure at the top of the building, while cold air sinking creates negative pressure at the bottom. This pressure difference causes the air to move through the building, from high-pressure areas to low-pressure areas, resulting in natural ventilation.

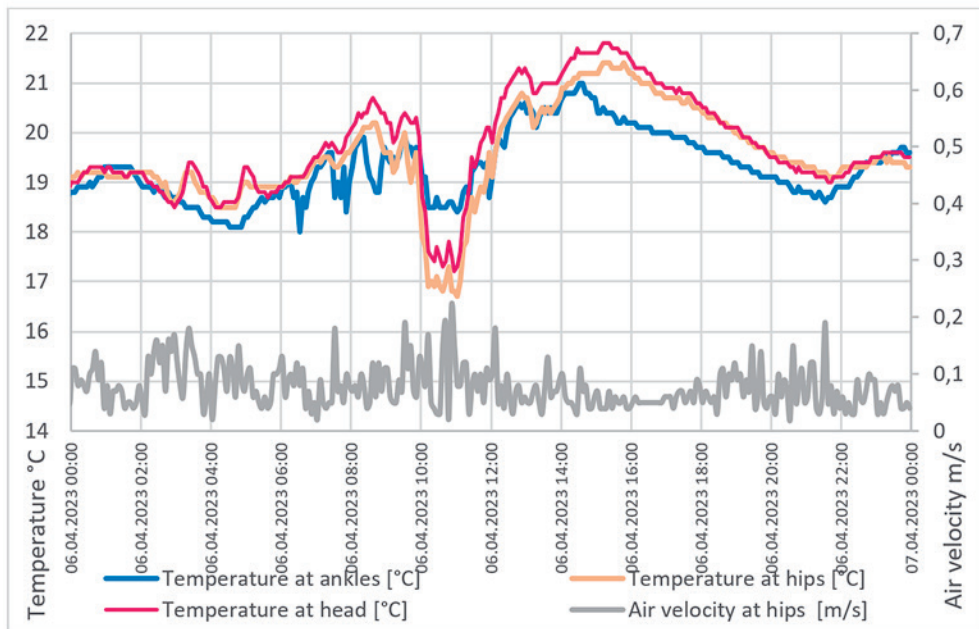


Fig. 4: Measurements on thermal comfort during stage 2

## 2.5 SUBJECTIVE ASSESSMENT

Subjective assessment of indoor air quality involves gathering feedback from building occupants on their perception of the indoor environment's air quality. It is an essential part of indoor air quality assessment as it provides valuable information about how building occupants perceive the indoor environment and how it affects their comfort, health, and productivity. In Slovakia, there are no specific standards or guidelines for subjective assessment of indoor air quality. However, the European standard EN 15251:2007 "Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics" recommends using the ASHRAE 55 thermal comfort standard and the ISO 7730 thermal comfort standard to assess thermal comfort. The ASHRAE 55 standard defines three primary comfort parameters that affect thermal comfort: air temperature, mean radiant temperature, and air speed. These parameters are used to calculate the predicted mean vote (PMV) index, which represents the thermal sensation of an average person in a given indoor environment. The standard also specifies the acceptable ranges of the PMV index, which should be between -0.5 and +0.5 for a sedentary activity level and between -1.0 and +1.0 for a light activity level.

In the second stage of the research, the heating system was turned off and the industrial doors were opened to create an air draught. Questionnaires were given to 18 participants, asking about their clothing, physical activity, and how they felt about the temperature. These answers were evaluated using the STN EN ISO 7730 standard and its corresponding formulas (1), (2).

$$PDD = 100 - 95e^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (1)$$

$$PMV = \frac{\sum(r \cdot n)}{\sum n} \quad (2)$$

PDD – Predicted percentage of dissatisfied occupants  
 PMV – Predicted mean vote  
 r – range based on ASHRAE 55  
 n – number of answers given

The predicted mean vote index was calculated based on the answers given in the questionnaires. The average thermal insulation of clothing (CLO) was 0,9 clo. This value represents a basic workwear involving: underwear, t-shirt, thick sweater, trousers, socks and boots. The maximum value was 1,12 clo, whereas the minimum value was 0,69 clo. The workers in this assembly hall are performing their work mainly in a standing position with light or medium-heavy movement of arms and torso. The average metabolic rate (Met) for the performed activities was 2,2 Met, which represents the activity explained above. The following table (Tab. 2) shows the answers on the question “How do you feel about the air temperature in this room?” and range to calculate the PMV index using the formula (2).

Tab. 2: Answers given in the questionnaires

	Cold	Cool	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	Warm	Hot
r	-3	-2	-1	0	1	2	3
n	1	3	4	8	2	0	0

r- range based on ASHRAE 55, n- number on answers given

PMV index ranges from -3 (very cold) to +3 (very hot), with 0 indicating a thermally neutral state. In this case, a PMV index of -0.61 suggests that the respondents felt slightly cool. PPD ranges from 0% (no dissatisfaction) to 100% (all respondents are dissatisfied). In this case, a PPD index of 12,83 suggests that approximately 13% of the respondents are likely to feel dissatisfied with the thermal conditions in the environment. Overall, these values indicate that the thermal conditions in the indoor environment may not be optimal for all the respondents, and some may feel slightly cool.

## 2.6 OCCUPANCY OF WORKING SPACE

During this part of the study, two workers were observed during their work shift (Fig. 5). One was a smoker and the other was a non-smoker. Both performed a similar job and worked near the measuring devices. The shift started at 6:00 and ended at 14:30. The time spent on breaks and working was recorded for each day and both stages. It was found that during the second stage, where discomfort was intentionally created, the total time spent on breaks was lower, despite a higher frequency of breaks.

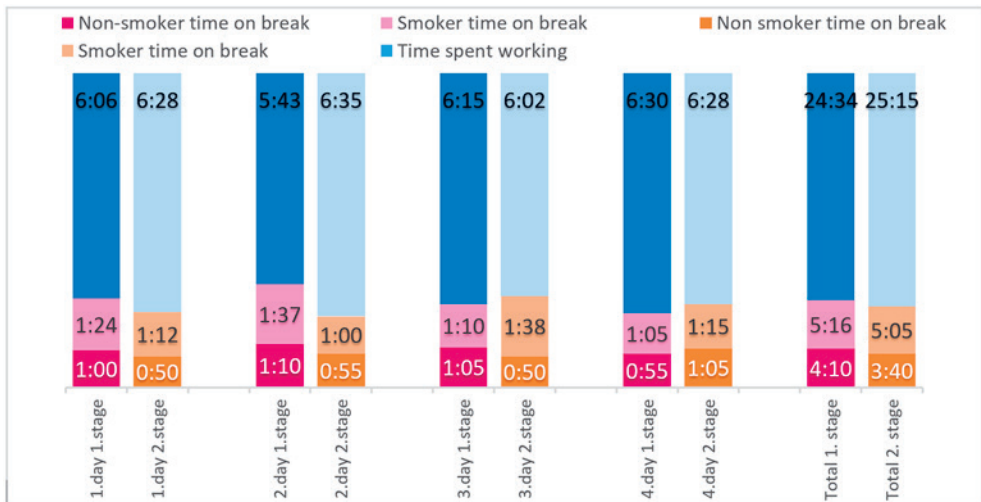


Fig. 5: Time spent on brakes and time spent working during both stages of observation

From a physical point of view, frequent breaks may not necessarily be problematic. In fact, taking regular breaks is often recommended to prevent musculoskeletal disorders. However, taking too many breaks or prolonged breaks may lead to a decrease in productivity and work quality. From a psychological point of view, taking frequent breaks can be beneficial in terms of reducing stress and increasing focus and productivity.

## ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic through grant VEGA 1/0304/21 and project KEGA 005/STU-4/2021

## LITERATURE

Decree of the Ministry of Health of the Slovak Republic No. 259/2008 Coll.

European standard EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics”

ASHRAE 55 thermal comfort standard

STN EN ISO 7730 thermal comfort standard

# Session 5b

## Digitales Bauen, Planen, Betreiben

### **BIMpeco – Umweltrelevante Produktdaten im Gebäudelebenszyklus**

Huemer-Kals, Figl / IBO / AT

Doczekal / GET / AT

Hengel / AEE INTEC / AT

### **Fehlererkennung und Fehleranalyse durch Frequenzanalyse**

Schnitzer, Ziermann / Forschung Burgenland GmbH / AT

### **Methods for generating Data Models from Building Automation schemas via pdf parsing**

Buruzs, Sipetic, Natiesta, Catal, Widauer / AIT / AT

Hollaus / Vasko+Partner GmbH / AT



**BIM MODELLING**  
& 3D Detail Engineering



**PROJEKTMANAGEMENT**



**ROHRLEITUNGSBAU**  
für Clean & Black Utilities  
(gem. cGMP und GEP Standards)



**ZAUNERGROUP.COM**

MAUER 20 | GEWERBEPARK,  
A-4702 WALLERN

**MODERNE PRODUKTIONS-  
STÄTTEN FÜR PHARMA**  
- Rohrleitungsvorfertigung



**SUSTAINABILITY**



# BIMpeco – Umweltrelevante Produktdaten im Gebäudelebenszyklus

V. Huemer-Kals<sup>1)</sup>, H. Figl<sup>1)</sup>, Ch. Doczekal<sup>2)</sup>, F. Hengel<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Wien, Österreich

<sup>2)</sup> Güssing Energy Technologies GmbH, Güssing, Österreich

<sup>3)</sup> AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich

**ABSTRACT:** Building products can pose a potential risk to the environment and health due to their pollutant content or the release of pollutants. This applies to the manufacture of the building products and the construction of the building as well as to the operation of the building - and the disposal phase at the end of the product or building life cycle. This qualitative product information is not shown in life cycle assessments and has not yet been systematically included in the BIM environment. Normative standards for product information management and product data templates over the building life cycle such as *ISO 19650-1 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles* and *ISO 23387 Building information modelling (BIM) — Data templates for construction objects used in the life cycle of built assets — Concepts and principles* have so far only been applied sporadically in proprietary systems. However, the information and documentation of the products used in the building is important for stakeholders in the entire value chain.

The BIMpeco project set itself the goal of developing the basics for the digital information management of qualitative, environmentally relevant product data. Product information management should take into account the entire life cycle and the entire supply chain, in particular with regard to ecological product management, tendering, awarding and billing, maintenance of materials and subsequent recycling.

Based on an intensive analysis of ISO 23387, the integration of data templates and data sheets into existing processes and data structures was examined. As a result, recommendations for a BIM-supported target process, including the integration of construction product data in the Common Data Environment (CDE), were developed.

Environmentally relevant product properties of building products and building services components were summarized in a new attribute model and transferred to around 40 data templates for exemplary product groups.

Data templates and data sheets are a very suitable means for product information management that accompanies the life cycle. One major advantage is the modularity of “construction objects” according to ISO 23387: several data sheets can be used to describe a single object from various aspects. Moreover, data can be stored in the Common Data Environment without having to access the BIM building model directly.

This potential makes the project results interesting for a wide variety of target groups, from product manufacturers to planners and experts, e.g. for ecological building product management, to the users of buildings. With the findings from the BIMpeco project, it became clear that the technology of data templates and data sheets will have a major influence on the data management of construction product data in the medium term.

## 1 MOTIVATION FÜR DAS FORSCHUNGSPROJEKT BIMPECO

Bauprodukte können aufgrund ihrer Schadstoffgehalte oder Schadstofffreisetzungen ein Risikopotenzial für die Umwelt und die Gesundheit darstellen. Dies gilt sowohl für die Herstellung der Bauprodukte und die Errichtung des Bauwerks als auch für den Gebäudebetrieb – und die Entsorgungsphase am Ende des Produkt- bzw. Gebäudelebenszyklus. Diese qualitativen Produktinformationen werden in Ökobilanzen nicht abgebildet und werden bislang in die BIM-Umgebung noch nicht systematisch einbezogen. Die Information und Dokumentation der im Bauwerk eingesetzten Produkte ist jedoch für Stakeholder in der gesamten Wertschöpfungskette von Bedeutung.

In Österreich wurden harmonisierte Standards zur Vermeidung von Schad- und Störstoffen in Bauprodukten etabliert. Erfolgreiche Beispiele für die Beschaffung schadstoff- und emissionsarmer Bauprodukte sind „ÖkoKauf Wien“ (AG Hochbau und Innenausbau), das Servicepaket „Nachhaltig Bauen in der Gemeinde“ und die „Nachhaltige Beschaffung (naBe)“ des Bundes, welche für schadstoff- und emissionsarme Produkte die sogenannten ÖkoBauKriterien vorschreiben. Diese werden digital in der online-Plattform <https://www.baubook.info/oea/> verwaltet und können über eine bestehende Schnittstelle in AVA-Software eingelesen werden.

Kriterienkataloge für Haustechnik und Beleuchtung wurden von der ÖkoKauf Wien Arbeitsgruppe „Haustechnik“ herausgebracht. Eine digitale Aufbereitung dieser Informationen wurde bisher nicht vorgenommen.

Normative Standards für das Produktinformationsmanagement und Produkt-Datenvorlagen über den Bauwerkslebenszyklus wie die ISO 19650-1 *Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Konzepte und Grundsätze* und ISO 23387 *Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Datenvorlagen für Bauobjekte während des Lebenszyklus eines baulichen Vermögensgegenstandes - Konzepte und Grundsätze* wurden bisher nur vereinzelt in proprietären Systemen angewandt.

Diese Ausgangslage führte zur Initiierung des Forschungsprojekts BIMpeco, das sich zum Ziel setzte, erstmals Grundlagen für das digitale Informationsmanagement von qualitativen umweltrelevanten Bauproduktdaten zu entwickeln. Das Produktinformationsmanagement sollte den gesamten Lebenszyklus und die gesamte Lieferkette berücksichtigen, im Speziellen im Hinblick auf das ökologische Produktmanagement, die Bauabrechnung, die Wartung der Materialien und die spätere Kreislaufführung.

Dafür sollten Workflows und Datenstrukturen für das digitale Informationsmanagement von umweltrelevanten Produktdaten festgelegt werden. Das Produktinformationsmanagement sollte in Anlehnung an ISO 19650-1 folgenden Prinzipien genügen:

- Verwaltung und Dokumentation im Common Data Environment (CDE, kollaborative BIM-Umgebung für alle – auch nichtgrafische – Informationen),
- Aufbau auf aktuellen Standards und Methoden
- Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus des Bauwerks,
- Weitergabe der Informationen entlang der Lieferkette,
- fortlaufende Spezifizierung der Informationsanforderungen,
- Qualitätssicherung der Informationen.

## 2 ENTWICKLUNG VON WORKFLOWS

Die Integration von Bauproduktdaten im Common Data Environment (CDE) wurde durch eine intensive Auseinandersetzung mit der ISO 23387 untersucht. Daraufhin wurden konzeptionelle Überlegungen zu Datenvorlagen und Datenblättern angestellt, deren Eingliederung in bestehende Abläufe und Datenstrukturen analysiert und Empfehlungen für einen BIM-gestützten Soll-Prozess erarbeitet. Dabei flossen Erfahrungen aus der Praxis maßgeblich in die Projektergebnisse ein, sowohl aus den Fachbe-

reichen des Projektkonsortiums (Ökologisches Bauproduktmanagement; Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung) als auch von Produktionsfirmen und Anwender\*innen von Bauproduktdaten.

In der ISO 23387 sind Grundsätze und Struktur von Datenvorlagen (Data Templates) für Bauobjekte festgelegt. Diese Datenvorlagen sollten in Verbindung mit IFC nach EN ISO 16739 verwendet werden, um offene BIM-Prozesse zu ermöglichen und zu unterstützen. Daher enthält die ISO 23387 Regeln für die Verknüpfung zwischen Data Templates und IFC Entities.

Nach ISO 23387 bezieht sich ein Data Template auf genau ein Bauobjekt (Construction Object). Dieses ist als „Objekt des Interesses im Kontext eines Bauprozesses“ definiert und kann beispielsweise ein Bauprodukt oder ein ganzes Bauteil (System) sein. Im Projekt BIMpeco wurden Bauprodukte und Haustechnikkomponenten als Construction Objects betrachtet. Dabei wurde zwischen Data Templates (nicht ausgefüllten Datenvorlagen) und Data Sheets unterschieden – letztere enthalten die für ein konkretes Produkt geltenden Werte, zumeist nach Angaben der Herstellerfirmen, wiewohl im Laufe der Lieferkette weitere Akteur\*innen Daten beitragen können.

Im Sinne des Projektfokus auf qualitative umweltrelevante Eigenschaften von Bauprodukten und Haustechnikkomponenten wurde untersucht, inwieweit sich die analogen Prozesse im ökologischen Bauproduktmanagement unter Nutzung von Data Templates und Data Sheets digitalisieren lassen. Die Datenanforderungen, die z.B. durch die festgelegten ökologischen Kriterien entstehen, sind bereits von Seiten der Auftraggeber\*in im Rahmen einer AIA (Auftraggeber-Informationen-Anforderung) zu formulieren und im Rahmen der Erstellung des BAP (BIM Abwicklungsplan) gegebenenfalls zu ergänzen. Bei der Erstellung des BIM-Gebäudemodells durch die Planer\*in sollten bei den IFC-Elementen bereits Informationen über ihre Materialität hinterlegt werden, sodass später im Prozess relevante Datenvorlagen für die entsprechende Bauproduktgruppe identifiziert werden können. Workflows und Standards zur Einbindung der Produktinformationen in den Prozess Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung wurden entwickelt. In diesem Fachbereich stehen mit der ÖNORM A 2063-2:2021 ein standardisierter Prozess und ein etabliertes Regelwerk zur Verfügung – und mit der Projektelementliste (BPEL) ein möglicher Ort der Verknüpfung zwischen IFC-Modell und Produktdatenblättern.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Empfehlungen für ein Lieferketten- und lebenszyklusbegleitendes Produktinformationsmanagement abgeleitet und in einer „Richtlinie für Produktmanagementsysteme im Common Data Environment“ sowie einer Beschreibung der Anforderungen an ein CDE zusammengefasst.

### 3 ENTWICKLUNG VON MERKMALEN

Kriterienkataloge, Normen und Anforderungen für die ökologische Beschaffung sowie die Kreislauf-führung von Bauprodukten und Haustechnikkomponenten wurden in ein Attributmodell übergeführt. Die Attribute (Merkmale) wurden in einer Excel-Tabelle gelistet und enthalten gemäß den normativen Vorgaben folgende Informationen:

- Einteilung in „Groups of properties“ mit bis zu drei Hierarchieebenen
- Bezeichnung der Eigenschaft: Hierbei handelt es sich um „specific properties“ im Sinn von ISO 23387.
- Datentyp: Gemäß der Datenstruktur nach ISO 23387 sind die Datentypen „Quantity“ (Measure with unit) oder „Enumerated Type Value“ (Auswahl aus einer Liste) möglich. Die durch die ISO 12006-3 implementierte Datenstruktur erlaubt z.B. auch Text- oder Datumsangaben.
- Einheit, falls vom Datentyp „Quantity“
- Wert: Bei „Enumerated Type Value“-Feldern ist die entsprechende Auswahlliste hinterlegt
- Referenzdokument: Zu jeder Eigenschaft kann ein Referenzdokument angegeben werden, das z.B. die Messmethode genau spezifiziert.
- Beschreibung

Für den Themenbereich der Beschaffung von schadstoff- und emissionsarmen Bauprodukten wurden die ÖkoBauKriterien herangezogen, die digital in der online-Plattform <https://www.baubook.info/oea/> verwaltet werden. Während bei der baubook-Deklaration jedoch häufig die Erfüllung der konkreten Kriterien abgefragt wird, sollten die BIMpeco-Attribute unabhängig von konkreten Kriteriensätzen und Grenzwerten ihre Aussagekraft behalten. Eine Herausforderung bei der Definition der Merkmale bestand darin, zwischen Aussagekraft der Parameter und Eingabeaufwand für die Produkthersteller abzuwägen. Zusätzlich gestalten sich einige der Kriterien komplex, lassen Ausnahmen zu oder die Erfüllung wird von anderen, nicht unmittelbar ökologischen, Produkteigenschaften beeinflusst.

Für die Haustechnik wurde das Attributmodell hinsichtlich bestehender Kriterienkataloge zu Haustechnikkomponenten aus der ökologischen Beschaffung (v.a. ÖkoKauf Wien) und Anforderungen für die Kreislaufführung analysiert. Nach ÖkoKauf Wien ist der Einkauf von Komponenten der Haustechnik wesentlich entscheidend wie nachhaltig ein Gebäude über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg ist. In der Ausschreibung sollen diese Kriterien berücksichtigt werden und als Entscheidungsgrundlage dienen. Auszugsweise aus dem Attributmodell für die Haustechnik sind folgende Eigenschaften für die ökologische Bewertung hervorzuheben.

- Einhaltung von Emissionsgrenzen: hierin werden Emissionsgrenzen für den Betrieb z.B. für Wärmeerzeugungsanlagen nach der Gesetzgebung definiert
- Erhebung Schadstoffe in Materialien für die Haustechnik: betrifft vor allem die Grenzwerte für Lackierungen bzw. Materialeinsatz und Betriebsmittel, z.B. Quecksilber in Energiesparlampen
- Wartung: bewirkt einen effizienteren Betrieb und längere Lebensdauer und damit Abfallvermeidung
- Energieeffizienz: spiegelt den CO<sub>2</sub>-Ausstoß z.B. von Wärmeerzeugern wider bzw. wie Primärenergie zur Verfügung gestellt wird.
- Inhaltsstoffe: ergibt sich hauptsächlich aus den Betriebsmitteln, welche für das Produkt benötigt werden, z.B. das Kältemittel oder das Glykol bei der Wärmepumpe.
- Lebensdauer: ist ein wesentlicher Faktor für die Abfallvermeidung und die ökologische Bilanz des Produkts.
- End-of-Life-Eigenschaften: umfasst die Entsorgung von Problemstoffen und die Kreislauffähigkeit der Produkte am Ende des Lebenszyklus.
- Produktausführung von HT-Komponenten: zielt darauf ab, bessere ökologische Eigenschaften zu generieren, z.B. Reduktion des Wasserverbrauchs durch wasserlose Urinalanlage oder Absorptionswärmepumpe statt Kompressionswärmepumpe.

Auf Basis der Kriterienkataloge wurden geeignete Attribute für das digitale Produktmanagementsystem extrahiert, normkonform definiert und in Form von Beispiel-Datenvorlagen gemäß ISO 23387 strukturiert. So entstanden Beispiel-Data Templates für ca. 40 Produktgruppen an Bauprodukten und Haustechnikkomponenten.

In Kooperation mit dem Innovationslabor „Digital findet Stadt“ wurden für IFC-Merkmale geeignete Attribute diskutiert. Als wesentliche Eigenschaft, die jedenfalls im Gebäudemodell hinterlegt werden sollte, wurde die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Produktgruppe identifiziert – dann können die benötigten passenden Datenvorlagen identifiziert werden. Dementsprechend wurde vom Kooperationspartner ein IFC-Merkmal-Set vorgeschlagen, das der phasenübergreifenden Zuordnung und Dokumentation von Bauproduktgruppen dient. Dieses ist an jeder IFC-Entität applizierbar und kann mit einer beliebigen Strukturierung in Produktgruppen (beispielsweise der Bauproduktliste der ÖNORM A 2063) verwendet werden.

## 4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die Projektergebnisse wurden an Hand beispielhafter Produktdatenblätter erprobt und in Workshops mit Produkthersteller\*innen und Anwender\*innen von Bauproduktdaten diskutiert.

Durch die strukturierte digitale Erfassung und Speicherung von Produktdaten wird der Prozess der Datenverwaltung weiter automatisiert und damit beschleunigt. Dies führt zu einer höheren Effizienz und reduzierten Arbeitskosten bei Anwender\*innen. Digitale Daten können automatisch validiert und verifiziert werden, wodurch menschliche Fehler minimiert werden. Dies führt zu einer höheren Datenqualität und verlässlicheren Ergebnissen.

Für das lebenszyklusbegleitende Produktinformationsmanagement von Bauprodukten und Haus-technikkomponenten stellen Data Templates bzw. Data Sheets ein sehr taugliches Mittel dar. Ein großer Vorteil liegt in der Modularität, mit der mehrere Datenblätter zur Beschreibung eines einzigen Objekts unter verschiedenen Aspekten benutzt werden können, ein weiterer in der Bereitstellung der Daten im Common Data Environment, ohne direkt auf das BIM-Gebäudemodell zugreifen zu müssen. Die in BIMpeco verwendeten Formate sowohl für den Datenaustausch als auch für die Datenhaltung, IFC und JSON, scheinen derzeit die langfristig nutzbaren Formate zu sein. Produktbeschreibungen können so bis zum Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes dokumentiert und genutzt werden.

Diese Potenziale machen die Projektergebnisse für verschiedenste Zielgruppen interessant, von den Produktherstellern über Planer\*innen und Fachexpert\*innen z.B. für Ökologisches Bauproduktmanagement bis zu den Nutzer\*innen von Gebäuden. Bis zur Umsetzung der Integration von Data Sheets (Produktdaten realer, käuflicher Bauprodukte) in ein CDE scheint es noch ein weiter Weg zu sein. Mit den Erkenntnissen aus dem Projekt BIMpeco wurde aber deutlich, dass die Technologie der Data Templates und Data Sheets mittelfristig einen großen Einfluss auf die Datenbeschaffung und das Management von Bauproduktdaten haben wird.

## LITERATUR

- ÖNORM EN ISO 19650-1: 2019 04 15 Organisation von Daten zu Bauwerken –Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Konzepte und Grundsätze (ISO 19650-1:2018)
- ÖNORM EN ISO 23387: 2020 11 15 Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Datenvorlagen für Bauobjekte während des Lebenszyklus eines baulichen Vermögensgegenstandes - Konzepte und Grundsätze

*Das Projekt »BIMpeco – Umweltrelevante Produktdaten in kollaborativen BIM-Umgebungen« wurde im Programm »Stadt der Zukunft« gefördert.*

*»Stadt der Zukunft« ist ein Forschungs- und Technologieprogramm des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Es wird im Auftrag des BMK von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gemeinsam mit der Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH (AWS) und der Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT) abgewickelt.*

Kontakt:

Veronika Huemer-Kals

IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie

Alserbachstraße 5/8

A-1090 Wien, Österreich

Tel. +43 1 3192005-20

veronika.huemer-kals@ibo.at

www.ibo.at



# Fehlererkennung und Fehleranalyse durch Frequenzanalyse

J. Schnitzer, D. Ziermann

Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: To detect errors in HVAC systems, a data-driven approach was presented for evaluating the patterns of measurement data. The method of correlation of measurement data patterns as well as the correlation of amplitude spectra was used to detect similar patterns occurring at connected measuring points in channel networks. By correlating the spectra generated by the FFT (Fast Fourier Transformation) method, the noise effect of the signals can be reduced by restricting the frequency range, and dependencies can be automatically detected. Additionally, by analysing the frequencies of measuring points in ventilation networks, the operation of the system can be detected by evaluating peaks in the frequency analysis. By evaluating the operational data in a graph model of the ventilation system, which can be generated from BIM, plausibility can be checked.

## 1 EINLEITUNG

Zur Optimierung von Gebäudetechnischen Systemen ist die Erkennung von Betriebsfehlern ein wesentlicher Bestandteil der Betriebsüberwachung durch Monitoring mittels einer Gebäudeleittechnik. Durch die Auswertung der Messdaten stehen eine Vielzahl von Methoden zur Fehlerdetektion zur Verfügung. Die Abb. 1 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Methoden.

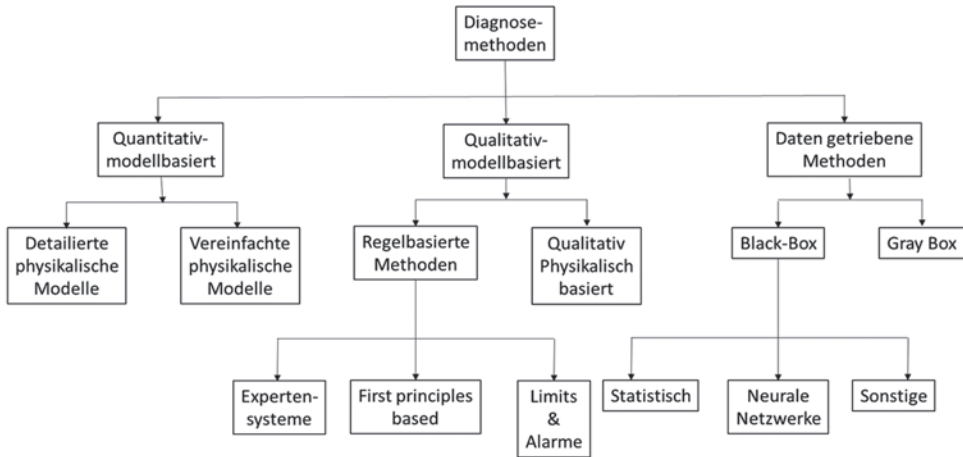


Abb. 1: FDD-Methoden nach Brambley & Katipamula (2005)

Zur automatisierten Auswertung ist eine Methode erforderlich welche ohne Expertenwissen Fehler und Anomalien erkennen kann und auf diese hinweisen kann. Zur Analyse des Betriebs von Anlagenteilen wurden die Temperaturmessstellen in Kanalnetzen einer datengetriebenen Auswertung unterzogen. Zur Auswertung der Signalverläufe wurde durch den Einsatz der Frequenzanalyse und der Korrelation

eine Auswertung der Signalverläufe durchgeführt. Dadurch ist die Möglichkeit der Plausibilitätsprüfung in Verbindung mit einem Graphenmodell geschaffen worden.

## 2 FREQUENZANALYSE

Die Frequenzanalyse ist ein Prozess, der verwendet wird, um die Frequenzkomponenten eines Signals zu identifizieren und zu quantifizieren. Ein Signal kann als eine Kombination von sinusförmigen Wellen unterschiedlicher Frequenzen betrachtet werden. Die Frequenzanalyse hilft dabei, diese einzelnen Frequenzkomponenten zu extrahieren und ihre Beiträge zum Gesamtsignal zu quantifizieren.

In der Praxis wird die Frequenzanalyse häufig auf zeitvariable Signale angewendet, wie z.B. Audio-, Bild- und Videosignale. Eine häufig verwendete Methode zur Frequenzanalyse ist die Fourier-Transformation, die ein Signal in seine einzelnen Frequenzkomponenten zerlegt. Die Fourier-Transformation konvertiert ein Signal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich und liefert ein Spektrum, das die Anteile der einzelnen Frequenzen im Signal angibt.

Das Spektrum enthält normalerweise Informationen wie die Grundfrequenz, harmonische Frequenzen, Rauschen und andere Signalartefakte. Durch Analyse des Spektrums kann man z.B. herausfinden, welche Frequenzen im Signal dominant sind und welche Frequenzkomponenten irrelevant sind. Dies kann bei der Signalverarbeitung, -analyse zur Früherkennung von Schäden in Maschinen und Anlagen eingesetzt werden. (Sewe 2018)

Zur Analyse von gebäudetechnischen Daten des Versuchsgebäudes Energetikum wurden die aufgezeichneten Messwerte eines cloudbasierten Loggingsystems (Aedifion) herangezogen. Die Aufzeichnung der Daten aus der Gebäudeleittechnik erfolgt Datenreduziert. Dazu werden nur Werte bei Wertänderung abgespeichert (Change of Value).

Zur Durchführung der Frequenzanalyse ist eine Aufbereitung der Messdaten notwendig. Aufgrund der Aufzeichnung durch Change of Value sind die Messwerte nicht in definierten Zeitumständen aufgezeichnet worden. Daher ist es notwendig die Messwertreihen in äquidistante Werte umzuwandeln. Dies geschieht durch eine Interpolation der Werte in einem Zeitabstand von 1 Minute. Um Unstetigkeit durch die Interpolation zu vermeiden wurde die Interpolationsmethode „pchip“ eingesetzt. Diese Interpolationsmethode ist formerhaltend und kubisch (Matworks 2022a). Dadurch kann der ursprüngliche Messwertverlauf wieder ausreichend genau wiederhergestellt werden.

Da die Messwerte in einer Gebäudetechnischen Anlage nicht um den Nullpunkt bewegen wurden die Werte immer in der Abweichung vom Mittelwert des entnommenen Zeitfensters in der Analyse verwendet.

$$x(t) = \frac{T(t)}{\bar{T}} \quad (1)$$

Die Darstellung der erhaltenen Frequenzspektren erfolgt in der Darstellung der Amplitude des jeweiligen Messsignals in Abhängigkeit der Periodendauer der jeweiligen Frequenz. Die Abb. 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Zulufttemperaturen im Lüftungssystem. Erkennbar sind hier die Abhängigkeit sowie der ähnliche Zeitliche Verlauf der Signale.

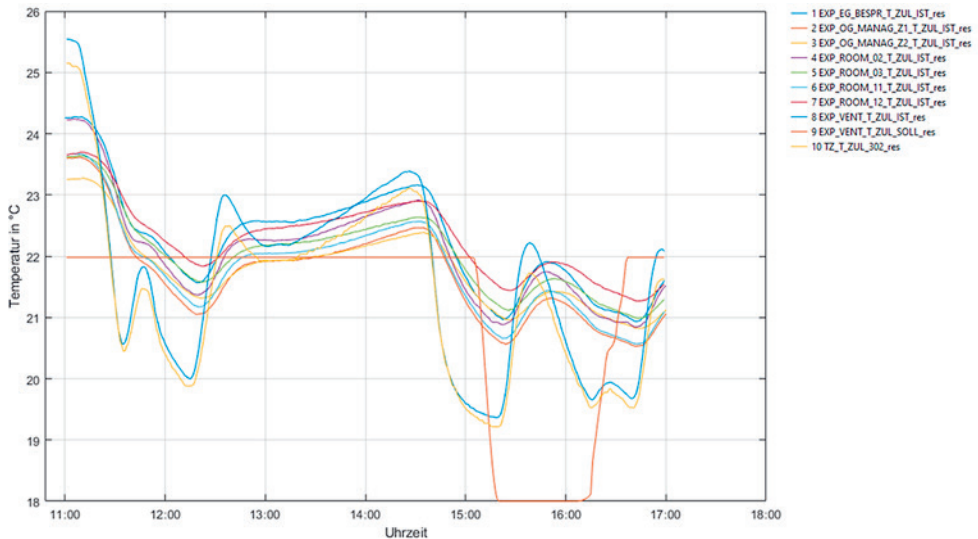


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf von Zulufttemperaturen

Auf Basis dieses Zeitfensters von 6 h wurde die FFT auf die jeweiligen Signale angewendet. Dadurch ergibt sich das Amplitudenspektrum in der Abb. 3.

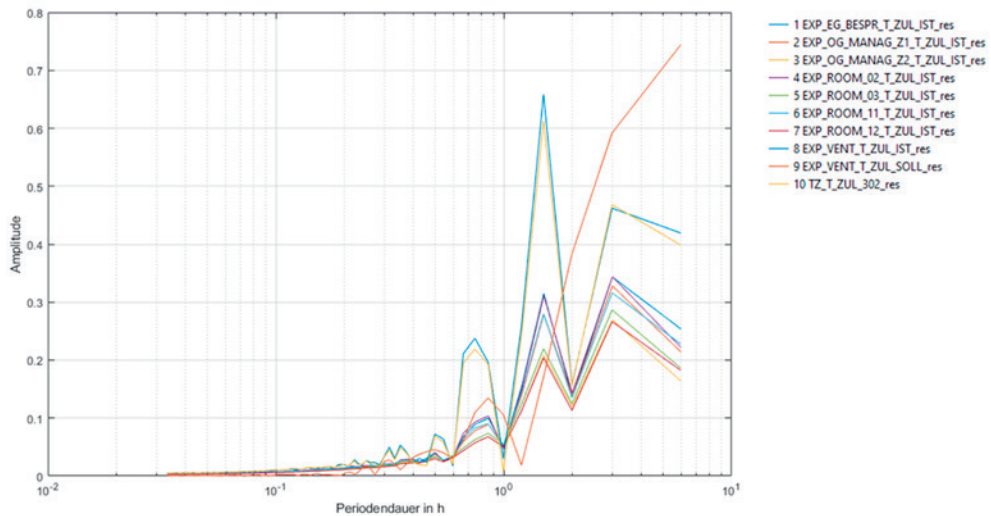


Abb. 3: Frequenzspektrum von Temperaturwerten im Lüftungssystem

Im Amplitudenspektrum zeigt sich deutlich, dass bei allen Signalen die Periodendauern über 0,2 h (12 min) gleichzeitig auftreten. Somit kann in diesem Bereich von einer Übereinstimmung der Verläufe gesprochen werden.

Eine Evaluierung der Verteilung durch Darstellung der Peaks des Amplitudenspektrums kann zur Ermittlung der Aktivität des jeweiligen Anlagenteils herangezogen werden. In der Abb. 4 sind die Höhe der Prominenz der Peaks (Matworks 2022b) in Abhängigkeit der Periodendauer dargestellt. Die Peaks sind für jeden Datenpunkt auf den maximalen Peak des Datenpunkts normalisiert.

Bei stark verrauschten Signalen, welche keine eindeutigen Peaks aufweisen, kann darauf geschlossen werden, dass hier keine Regelung stattfindet. Messwerte, welche geregelt werden, weisen eindeutige Peaks im Bereich hoher Periodendauern auf. Daraus kann geschlossen werden, ob Anlagenteile stillstehen oder betrieben werden.

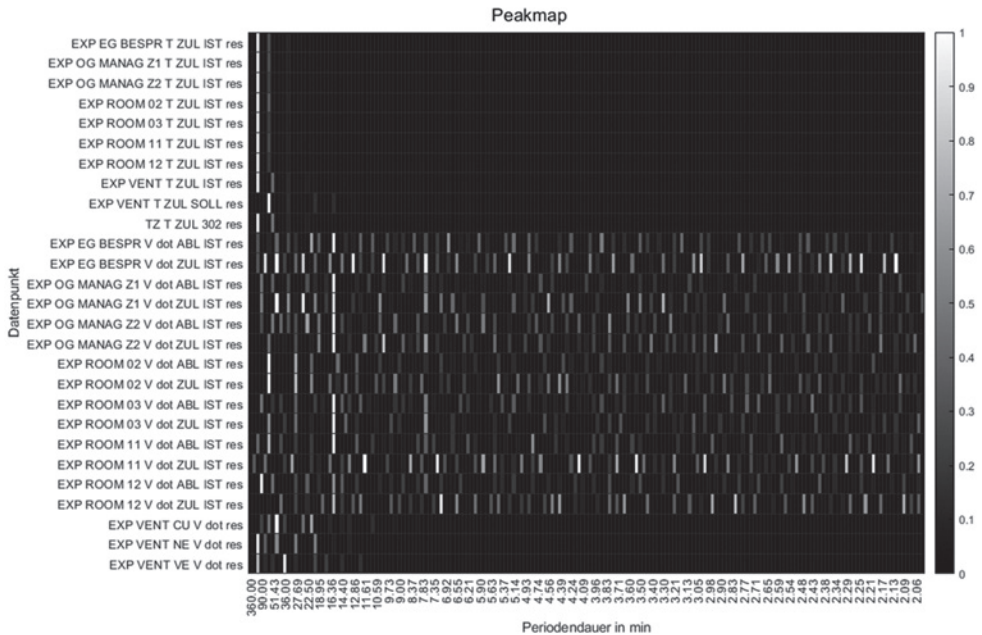


Abb. 4: Peakmap der Lufttemperaturen

### 3 KORRELATION

Zur Überprüfung der Ähnlichkeit von Verläufen wurde die lineare Korrelation zwischen Messwerten durchgeführt. Fühler, welche in einem Leitungsstrom liegen, müssen, sofern keine thermische Behandlung des transportierten Mediums stattfindet, ähnliche bis gleiche Zeitliche Verläufe aufweisen. Zu dieser Analyse wurde die lineare Abhängigkeit von Messwerten mittels Pearson Korrelation ermittelt. Der Korrelationskoeffizient  $r$  der Pearsonkorrelation liegt immer im Bereich von  $[-1,1]$ . Ein Wert 0 bedeutet, dass keine Korrelation vorliegt (Siebertz et al. 2017). Für eine Gültigkeit einer Abhängigkeit wurde in der Auswertung ein Wert  $|r| > 0,9$  angesetzt.

Mit dieser Korrelation können sowohl die Zeitreihe sowie auch die Frequenzspektren korreliert werden. Um das Rauschen der Signale bei der Betrachtung nach Ähnlichkeiten reduzieren zu können, wurde bei der Korrelation von Frequenzspektren immer jener Bereich des Spektrums mit einer Periodendauer von 12 min bis 3 h herangezogen.

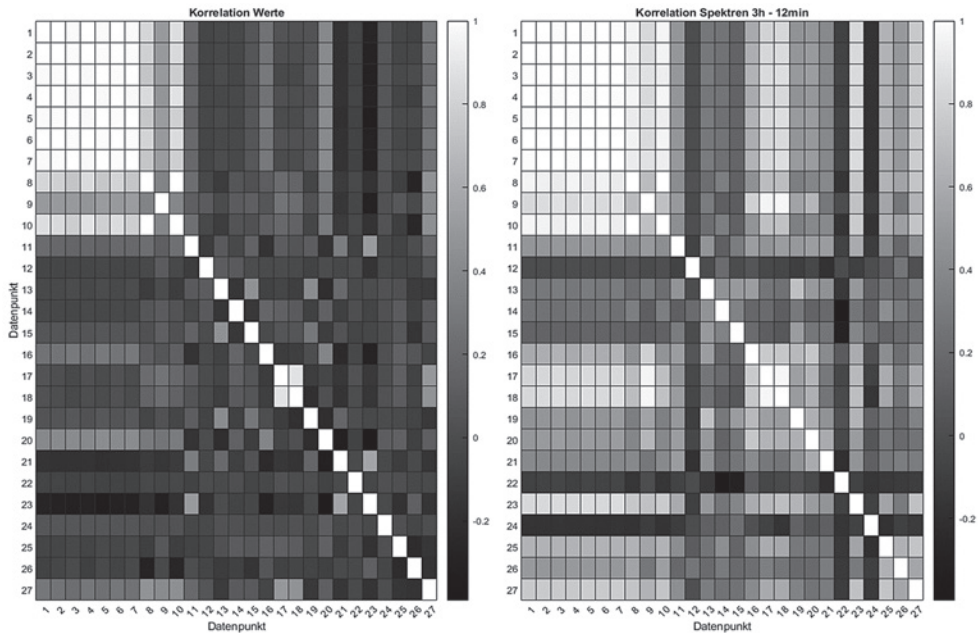


Abb. 5: Korrelation der Messreihen und der Spektren

Bei der Korrelation hat sich gezeigt, dass die lineare Korrelation der Zeitverläufe grundsätzlich ähnliche Verläufe identifizieren kann. Aufgrund von Phasenverschiebungen durch unterschiedliche Zeitkonstanten oder Totzeiten welche durch Laufzeitdifferenzen zustande kommen, kann durch die Korrelation der Amplitudenspektren auf ähnliche Verläufe geschlossen werden. Durch die Einschränkung der Periodendauerbereiche bei der Korrelation kann der Effekt von Signalrauschen reduziert werden. In der Abb. 5 ist der Datenpunkt mit der Nr. 8 die Zulufttemperatur des Zuluftsystems. Grundsätzlich sollte dieser mit den Zulufttemperaturen der Datenpunkte 1-7 korrelieren. In der Korrelation der Amplitudenspektren zeigt sich eine bessere Übereinstimmung. Im Falle einer nicht vorhandenen Korrelation kann dadurch auf Fehler im Luftsystem geschlossen werden.

#### 4 GRAPHENMODELL FÜR LÜFTUNGSNETZWERK

Zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Messwerten wurde für das Lüftungsnetzwerk ein Graphenmodell auf Basis eines BIM-Modells erstellt. In diesem Graphenmodell sind die Bauteile des Zuluftsystems auf Basis eines IFC-Modells des Versuchsgebäudes Energetikum erstellt worden. Die Basis für die Erstellung stellt der Export eines IFCxml-Files (ISO 10303-28:2007) aus dem IFC-Modell der Lüftungsanlage des Energetikums dar. Zur Durchführung der Untersuchungen wurde das Zuluftsystem herangezogen. Die Zuordnung der Messstellen erfolgte in manueller Zuordnung der jeweiligen Global ID des jeweiligen Kanalstücks, in welchem der Sensor verbaut ist. Die Abb. 6 zeigt das Graphenmodell des Zuluftsystems. Die Knoten bilden die einzelnen Kanaleinbauteile ab. Die Knoten mit Messdaten wurden mit verstärktem Punkt dargestellt.

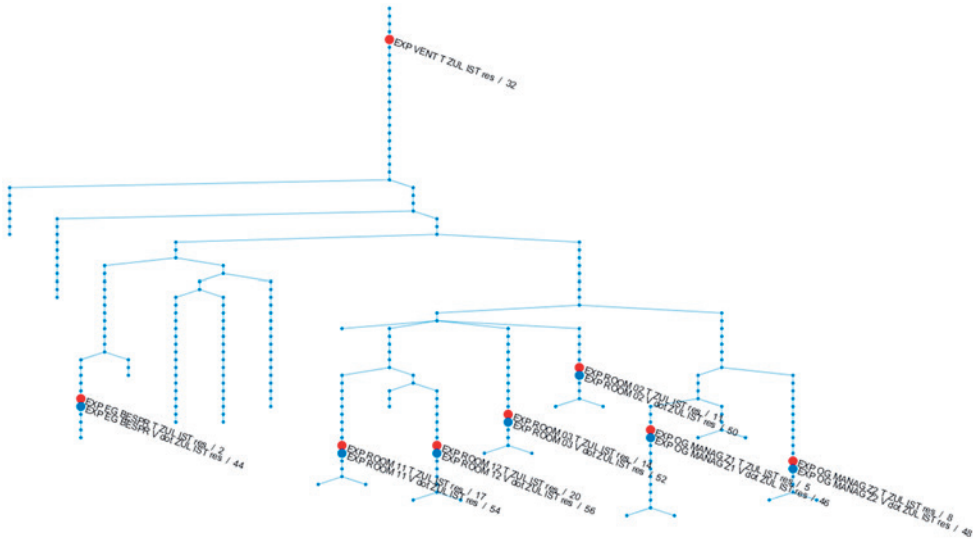


Abb. 6: Graphenmodell des Zuluflsystems

Durch die Auswertung der Peaks werden die in Betrieb befindlichen Datenpunkte im Graphen eruiert. Über die Zusammenhänge im Graphen kann der Zusammenhang zwischen den Datenpunkten erkannt werden, wenn eine Verbindung zwischen den Messwerten über das Kanalsystem besteht. Ein Abgleich mit der Korrelation sowie den Betriebsdaten ermöglicht die Erkennung von Betriebsfehlern oder Betriebsstörungen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Um Fehler in einer HKLS-Anlage erkennen zu können, wurde ein datengetriebener Ansatz zur Auswertung der Muster der Messwertverläufe vorgestellt. Zur Erkennung von ähnlichen Verlaufsmustern, welche bei zusammenhängenden Messstellen in Kanalnetzen auftreten, wurde die Methode der Korrelation von Messwertverläufen sowie die Korrelation von Amplitudenspektren herangezogen. Durch die Korrelation der Spektren, welche durch die Methode der FFT (Fast Fourier Transformation) erzeugt wurden, kann durch Einschränkung des Frequenzbereiches der Störeffekt des Rauschens der Signale reduziert werden und Abhängigkeiten automatisiert erkannt werden. Weiters kann durch die Frequenzanalyse der Messstellen in Lüftungsnetzwerken der Betrieb der Anlage durch Auswertung von Peaks in der Frequenzanalyse detektiert werden. Durch die Auswertung der Betriebsdaten in einem Graphenmodell der Lüftungsanlage, welches aus BIM generiert werden kann, wird die Plausibilität überprüft.

## ACKNOWLEDGEMENT

Diese Arbeit wird im Rahmen des FFG-Förderungsprogramms „Stadt der Zukunft“ 7. Ausschreibung finanziell unterstützt.

## **LITERATUR**

- Brambley M., Katipamula S. (2005) Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems — A Review, Part I; HVAC&R Research Volume 11(2) ASHRAE; DOI:10.1080/10789669.2005.10391133
- ISO 10303-28:2007, Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 28: Implementation methods: XML representations of EXPRESS schemas and data, using XML schemas, ISO/TC 184/SC 4 Industrial data
- Mathworks, (2022a) Matlab 2022b Dokumentation, interp1-Funktion
- Mathworks, (2022b) Matlab 2022b Dokumentation, findpeaks-Funktion
- Sewe E. (2018) OBSERVE Arbeitspaket B.3 Fehleranalyse, Plenum Ingenieurgesellschaft für Planung Energie Umwelt m.b.H.
- Siebertz K., van Bebber D., Hochkirchen Th. (2017) Statistische Versuchsplanung 2.Auflage, VDI-Buch, Springer-Verlag GmbH Deutschland

### **Kontakt:**

Johannes Schnitzer  
Forschung Burgenland GmbH  
Campus 1  
A-7000 Eisenstadt, Österreich  
Tel. +43 5 7705-5438  
[www.forschung-burgenland.at](http://www.forschung-burgenland.at)



# Methods for generating Data Models from Building Automation schemas via pdf parsing

A. Buruzs<sup>1)</sup>, M. Sipetic<sup>1)</sup>, Th. Natiesta<sup>1)</sup>, M. Hollaus<sup>2)</sup>, J. Catal<sup>1)</sup>, E. Widauer<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *AIT Austrian Institute of Technology, Wien, Austria*

<sup>2)</sup> *Vasko+Partner GmbH, Wien, Austria*

**ABSTRACT:** Digital planning is the standard of Building Automation (BA) design. However even if the available software tools implement the standard formats like VDI3814, the interface to other stakeholders like hydraulic planning, building services and instrumentation and control (I&C) are often missing or non-satisfactory. The goal of the project Digiaktiv – “digital transformation for greater interactivity in technical building equipment planning” is therefore to improve the continuous digital link between the different stakeholders and planning tools through neutral open data models. One of the approaches chosen in the project addresses the above-mentioned interface incompatibilities between the proprietary BA and I&C design tools. To address this gap, a methodology was developed to parse BA schemas exported in PDF format by proprietary BA design tools. For the data transformation a software prototype was developed, that is capable to extract the required information from the BA schemas like data point identifiers, text representation, and the BA function structure including the connections. The extracted information can be converted to any textual format, can be visualized in web browser, and interfaces to a central building services and automation database being developed within the Digiaktiv project.

## 1 INTRODUCTION

Building Automation and Control Systems (BACS) enable the economical and energy-saving control of heating, ventilation, air conditioning, cooling (HVAC), domestic water heating, and lightning equipment. Through advanced data monitoring and metering functionalities also enable the energetic evaluation and optimization of building operations, as well as prompt failure detection, and diagnosis. BACS systems heavily influence the energy efficiency of buildings (DIN 2017). There are multiple information models available as technical implementation of BA systems using fieldbus-based (KNX, LonWorks, BACNet, OPC UA, oBIX, etc.) and wireless-based (Zigbee, Z-Wave, EnOcean, etc.) communication (Domingues et al. 2016) one surprising aspect of building automation (BA). The various technologies are not compatible with each other, that causing heterogeneity in BA technologies. To create a homogeneity at least in the BACS design, standards were set up. In the German speaking countries, the VDI 3814 is the most widely accepted standard. It specifies the requirements of the BACS design workflow. The proprietary BACS design tools following this standard (e.g., WSCAD, <https://www.wscad.com/en/engineering-disciplines/building-automation/>) can create schema exports in this standard format. The problem we have identified during the Digiaktiv project (<https://projekte.fhg.at/projekt/3793874>), is that the export from the BA design tool is only partly machine-readable. That makes working with the design hard for other stakeholders, and they often have to redraw the system design in other tools. We have identified a great need for an automatic software interface between the BA tool and other Application Software, which can automatically interpret BACS design sheets and convert them to machine readable format with no manual work, or in a semiautomatic way, with only limited manual input.

Recently automatic digitalization of Process and Instrumentation (P&I) diagrams were in focus of scientific research. Nurminen et al. (Nurminen et al. 2020) have used the YOLO deep neural network

to classify icons of components (like valves, pumps or tanks) on pixel-graphical scans of P&I schemas. They did not focus on recognizing connections, and their method had difficulty in recognizing small components that are smaller than 15% of the image size. In a recent study (Theisen et al. 2023) the two stage neural network Faster R-CNN was applied for digitization of chemical process flow diagrams, as it was reportedly performs better for recognizing small objects. They also developed a pixel search algorithm for detecting connections between the components. In our project we had slightly different component classes, and different schema structure, and our main task was processing pdf documents, which are storing vector graphical objects like lines and rectangles, that were helpful in detecting the connections.

The Digiaktiv project addresses the topic of data exchange throughout the building design process and focuses specifically on the predesign phase and design phase of the construction process.

In the first phase of the project different data exchange scenarios were identified. Next, a set of parameters of different HVAC components and sensors and actuators was identified, and naming and typing thereof agreed among partners to ensure data exchange of the sufficient quality. The relevant part of the development process was identified, and data exchanges mapped to it.

The central Data Hub envisioned in the Digiaktiv project will have the presented interface to the BACS plan schemas. It will have consistency planning functionality, and graphical views for plant layout and HVAC plan. It will also be able to generate output for detailed Electrical Instrumentation and Control planning.

## 2 REQUIREMENTS

### 2.1 BUILDING AUTOMATION DATA FORMAT

In the German speaking countries the VDI 3841 standard is the most widely accepted standard for storing facility and Building Automation and Control Systems (BACS) design. Majority of the BA design tools implement the specifications of this standard. The VDI standard specifies the format of the facility BA schema, that usually can be exported in pdf format.

An export of the Building Automation schema in pdf format has several blocks of information. At the top are characteristic curves of the BACS functions, the diagrams visualize the output value depending on the input (see section 7 on Fig. 1). The biggest block is the system graphics, that usually shows a hydraulic diagram of the system. According to VDI3814(VDI 2022) this graphics can be project specific, can contain zone images, room images, facility part diagrams, tables etc.. The BACS identification labels (IDs) are usually also located in the diagram. The components are connected by vertical dashed lines with the label blocks of the Building Automation export. The plain text representations of the data points are located in the middle and grouped hierarchically in blocks (see the region 4 of Fig. 1). The next section marks the provided data point object type (analog input, analog output, digital input/output). Further solid vertical lines connect the signal labels with the BACS function structure diagrams (section 6 on Fig. 1). The automatic interpretation/digitalization of these function diagrams is the main focus of the present study.

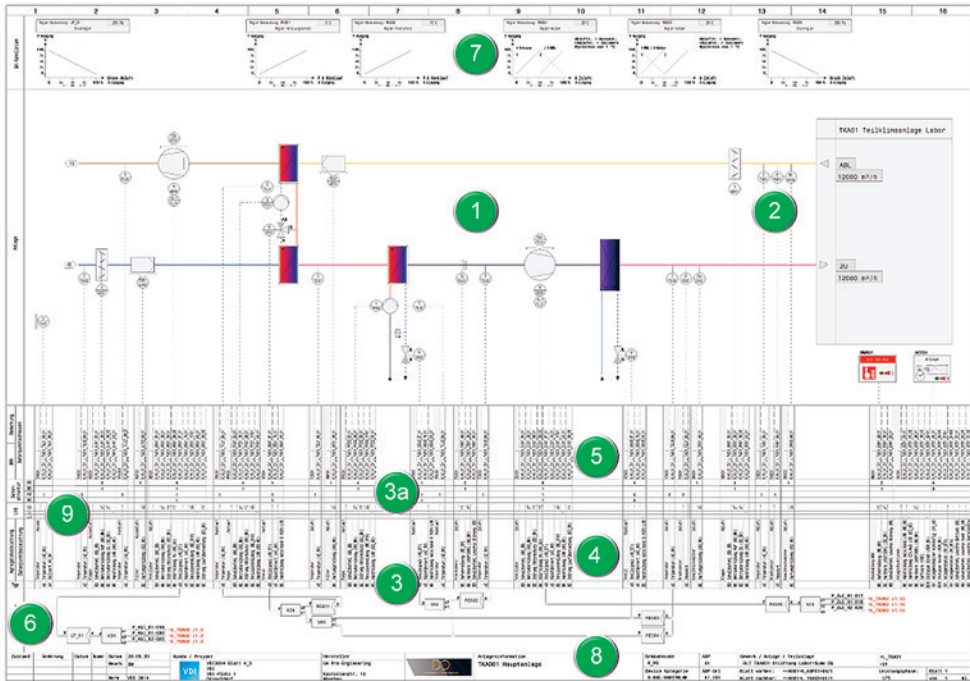


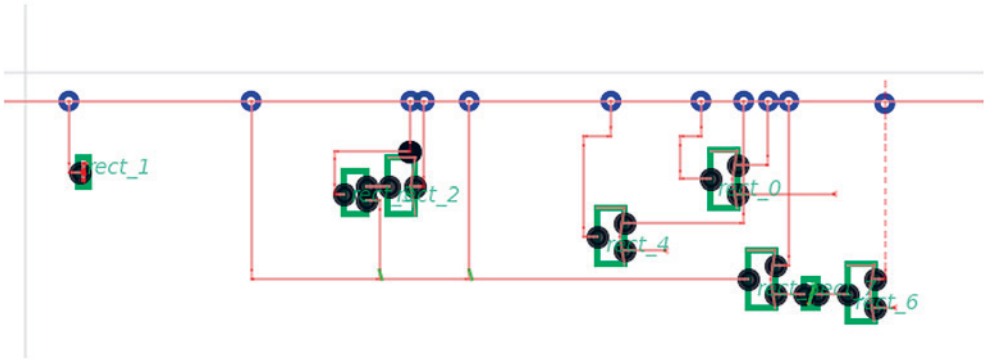
Fig. 1: Example of the structural layout of a building automation function schema according to VDI 3814. Taken from (VDI 2022)

### 3 METHOD AND IMPLEMENTATION

We focus on the extraction of the information stored in the BACS function structure diagrams (section 6 on Fig. 1). To process this part of the diagram, first we need building blocks to extract vertical and horizontal lines from the pdf. We have used the `pymupdf` python package (McKie et al. 2023) to read the pdf documents generated from the BACS schemas. Using this library straight lines, rectangles, and textboxes are automatically extracted from the pdf document. Development of additional python script were needed to handle dashed lines, as they are represented in a pdf as multiple short straight lines.

First, we extract the vertical lines, that cross the upper edge of the Control Diagram block, see the purple circles on Fig. 2. We call these points ‘interface terminals’. These points are important to match the labels on the text representation block, as the x-coordinate of these points are used to match the corresponding text boxes. From the text representation we extract the corresponding text-blocks, especially the header label, and text label of the datapoint (see Fig. 3 A). The datapoints on the plant schemas are connected through dashed lines with the text labels. Having the horizontal coordinate of the text-block, we can match the datapoints with those vertical dashed lines on the plant schemas (the example match-points are marked as orange circles on Fig. 3/B). These vertical dashed lines are often continued in horizontal dashed lines, terminating in icons of the component/sensors. We parse these vertical/horizontal dashed lines from the pdf document and match the two ends of the dashed lines (the orange circles with the pink or green ones on Fig. 3/B). From the upper terminal endpoint of these dashed connections, we extract the BACS automation identifier of the component as the closest text-box to the terminal point in the pdf document. If there are multiple textboxes are within some limited distance, then we collect the first three closest labels, and we leave to the manual operator to select the

correct one from the proposed choices. This way we can connect the BACS identifiers of the datapoints from the system representation with the text-representation of the data, and the interface terminals of the function structure diagrams.



*Fig. 2: Parsing of the BACS function structure diagram*

The function structure diagrams are processed as follows: first the horizontal and vertical lines are extracted from the pdf document with the help of the `pymupdf` python library. Then horizontal rectangles are detected from the pixel graphical representation of the diagrams. For this we developed a simple proprietary python code. The rectangles represent the control function blocks (these are the marked green rectangles on Fig. 2). The points when the connection lines are touching the control blocks, we call control terminals (marked by black circles on Fig. 2). We create pairs of connected lines, and we use these connections to calculate links from the interface terminals (blue circles) to control terminals (black dots) and calculate links between the control terminals. This way we practically build up a graph of control blocks and connections. We also detect labels  $(x,y,w)$  of the control blocks, from that we can determine whether the terminal is input ( $x$  or  $y$  label) or output (label  $w$ ). This means that we can assign a direction to the connections. We also detect the text labels of the control blocks (like “D01”, “MIN”, “MAX”, etc.) based on the label distance.

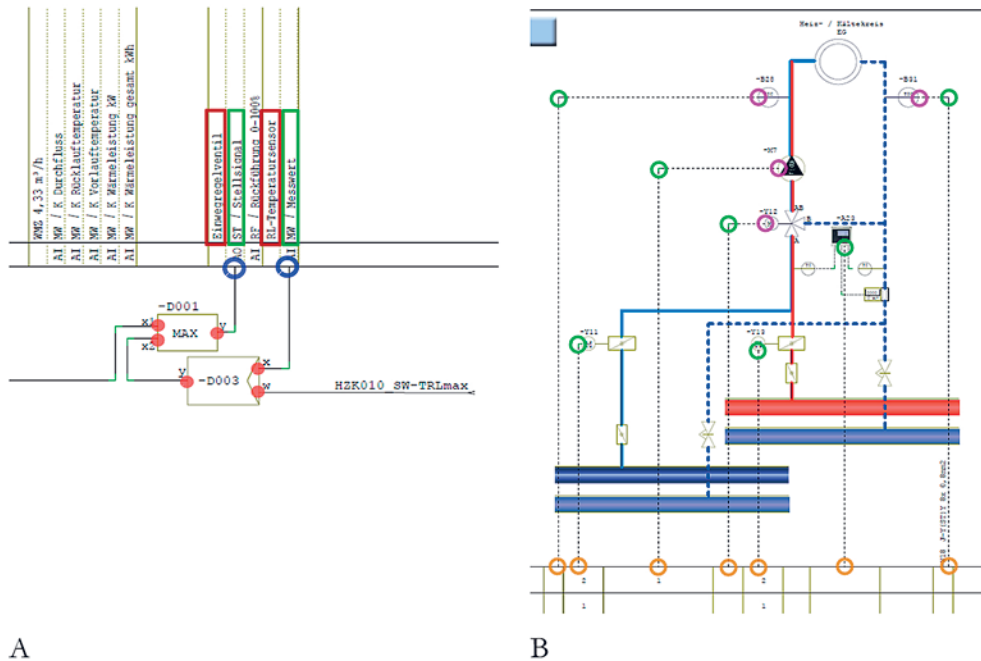


Fig. 3: A) Matching control signals to text labels. Blue circle: Interface terminal, green rectangle is the found matching text label is marked, red is the matched label header. Orange dots are the control terminals, where the connections are docking to the control blocks. B) Parsing of the hydraulic/BACS system schema.

After extracting all the above-described information, we can also visualize the stored information with a diagram chart. We use the *jointjs* javascript library (client IO 2022) to visualize the parsed information (see Fig. 4). We wrote a python code, that automatically creates the JavaScript code of the diagrams. These diagrams can be embedded in any website and provide an interactive visualization. This visualization can be very useful for manual operators and test engineers to visually detect failures or bugs in the parsing process.

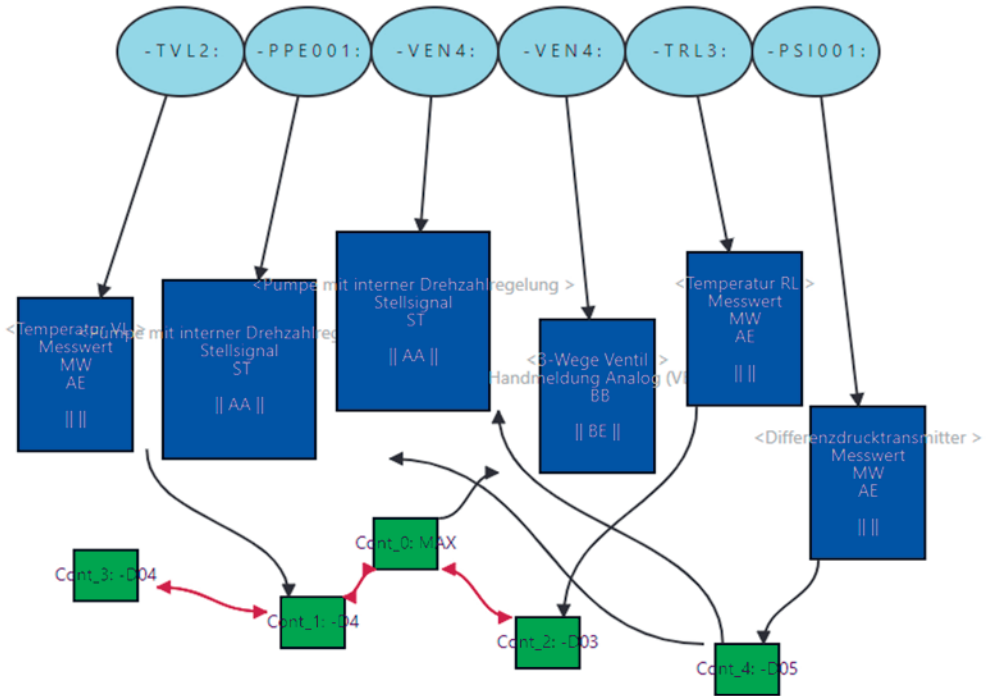


Fig. 4: Example of parsed information, auto-generated JavaScript chart. Upper part are the extracted labels containing the BACS identifiers, the blue rectangles contain the text representation with the headers, and the datapoint type. The lowest part is the graph with the BACS function structure.

## 4 OUTLOOK AND POSSIBLE IMPROVEMENTS

The presented work represents the first steps of general BA scheme processing and provides the open-source software code for the interested readers (<https://github.com/AdamBuruzs/BAschema2model>). There are still open questions remaining, that can be addressed in follow-up projects.

The developed prototype was only tested on pdf exports of the WSCAD-BA software. Testing and adjusting the code for the outputs of other VDI3814 compliant Software tools is still missing. Changes in the program would be required to process scanned documents in raster graphics file format. Recognition of text on raster images is a long studied engineering field, well tested solutions exists for optical character recognition (Rosebrock 2018), that are needed to process text on raster images. Interesting follow-up topic would be the recognition of hydraulic components on the facility schema images with the help of Artificial Intelligence powered object detection algorithms like in references Theisen et al. (2023) and Nurminen et al. (2020). The BA engineers who are using the BACS schemas often like to categorize the HVAC hydraulic circuits into the standard classes (throttle circuit, diversion circuit, mixing circuit, injection circuit with 2 or 3 port valves, etc.) The automatic classification of hydraulic diagrams (or sub-diagrams) is a challenging, but promising idea for future projects.

## 5 CONCLUSION

We have developed a Software prototype using python programming language to automatically parse VDI3814 compliant BACS schemas. The program receives a BACS schema PDF export, and processes the content, extracting labels, text representation and BACS function structure that implements functional connections between the datapoints. The source code is open sourced on github, and free to download from <https://github.com/AdamBuruzs/BASchema2model>. In the FFG financed Digiaktiv project this BACS schema parsing Software interface component will be utilized by a Building Automation Data Hub that is currently under development.

## ACKNOWLEDGMENTS

The presented R&D activity was financed by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) Grant nr. 3793874. Special thank goes to the project partners for the valuable discussions: Barbara Beigelböck and Lisa Bischanka from Vasko+Partner GmbH, Paul Hölzl and Michael Herzlieb from EAM Systems GmbH, and ex -AIT colleague Aurelien Bres.

## LITERATURE

- DIN. (2017) DIN EN 15232-1:2017-12, Energieeffizienz von Gebäuden - Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation Und Gebäudemanagement - Module M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; Deutsche Fassung EN\_15232-1:2017. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2561591>.
- Domingues P., Carreira P., Vieira R. & Kastner W. (2016) Building Automation Systems: Concepts and Technology Review. *Computer Standards & Interfaces* 45 (March): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.11.005>.
- IO, s.r.o. client. (2022) JavaScript Diagramming Library for Interactive UIs – JointJS. 2022. <https://www.jointjs.com/>.
- McKie J., Ruikai Liu, and Artifex Inc. (2023) Module Fitz — PyMuPDF 1.22.1 Documentation. 2023. <https://pymupdf.readthedocs.io/en/latest/module.html>.
- Nurminen, J.K., Rainio, K., Numminen, JP., Syrjänen, T., Paganus, N., Honkoila, K. (2020) Object Detection in Design Diagrams with Machine Learning. In *Progress in Computer Recognition Systems*, edited by Robert Burduk, Marek Kurzynski, and Michał Wozniak, 27–36. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19738-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19738-4_4).
- Rosebrock A. (2018) OpenCV OCR and Text Recognition with Tesseract. PyImageSearch (blog). September 17, 2018. <https://pyimagesearch.com/2018/09/17/opencv-ocr-and-text-recognition-with-tesseract/>.
- Theisen M. F., Flores K.N., Schulze Balhorn L. & Schweidtmann A.M. (2023) Digitization of Chemical Process Flow Diagrams Using Deep Convolutional Neural Networks. *Digital Chemical Engineering* 6 (March): 100072. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100072>.
- VDI. 2022. VDI 3814 Blatt 4.3 - Gebäudeautomation (GA) - Methoden und Arbeitsmittel für Planung, Ausführung und Übergabe - GA-Automatationsschema, GA-Funktionsliste, GA-Funktionsbeschreibung. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3814-blatt-43-gebäudeautomation-ga-methoden-und-arbeitsmittel-fuer-planung-ausfuhrung-und-uebergabe-ga-automatationsschema-ga-funktionsliste-ga-funktionsbeschreibung>.



# Session 2c

## Elektronik und Photonik

### **Reflexionsspektren-basiertes Pflanzenmonitoring zur Vitalitätsbestimmung**

Schuh, Czerny / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT

### **In-situ Delaminationsmessung in Mehrlagenstrukturen der Elektronik**

Walter, Khatibi / TU Wien / AT

### **Benefits and Challenges for Location-Based Services using Visible Light Technologies**

Krutzler, Weiss, Kröpfl / JOANNEUM RESEARCH / AT



# Reflexionsspektren-basiertes Pflanzenmonitoring zur Vitalitätsbestimmung

S. Schuh<sup>1)</sup>, B. Czerny<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

**ABSTRACT:** With the challenges of the energy crisis and climate change, green facades are becoming increasingly important in architecture. They enable physical shading of building walls, promote evapotranspiration in summer, increase thermal insulation in winter, and improve the climate in urban areas. An optimal supply of water and nutrients to the plants is a basic requirement for a functioning green facade. In order to keep the maintenance effort and the associated costs low, an automated recording of the plant condition is necessary, ideally contactless, e.g., by camera. During photosynthesis, which takes place in the cells of plant leaves, the energy of sunlight is stored in the form of chemical energy through the production of glucose. Leaves absorb incident light mainly in the blue and red wavelength range. The absorption and reflection characteristics of the plant depend on the activity of the plant cells. Therefore, by measuring the reflected light, it is possible to determine the vitality of the plant. This information can be used to set up an autonomous plant monitoring system. In order to be able to react early to changes in the vitality of plants, this method must be able to detect even the smallest changes in the reflectance spectrum. In the present study, the reflectance spectrum of water-stressed plants was investigated in a wavelength range from 200 nm to 1.100 nm and from 7.500 nm to 13.000 nm. Different calculation methods from the literature and their sensitivity to changes in the reflectance spectrum as well as their respective monotonic behavior were considered and compared in detail. One of the methods investigated was able to predict the wilting of leaves due to lack of water half an hour before it was externally visible. In an automated irrigation system, this information can be used to ensure that plants are always adequately supplied with water with minimal use of resources.

## 1 EINLEITUNG

Aufgrund der steigenden Temperaturen, insbesondere in städtischen Gebieten, gewinnen begrünte Fassaden zunehmend an Bedeutung. Sie ermöglichen die physische Beschattung der Gebäudewände, fördern im Sommer die Evapotranspiration und erhöhen im Winter die Wärmedämmung. Damit die Fassadenbegrünung auch tatsächlich den gewünschten Effekt erzielt, müssen sich die Pflanzen jederzeit in einem optimalen Vitalitätszustand befinden. Dies erfordert eine gezielte Bewässerung und eine optimale Nährstoffversorgung. Bei der Implementierung eines automatischen Bewässerungssystems ist es daher notwendig, jederzeit Informationen über den Zustand der Pflanzen zur Verfügung zu haben. Im Idealfall wird hierzu ein berührungsloses Messverfahren eingesetzt, das Rückschlüsse auf die Vitalität der Pflanzen zulässt.

Pflanzen nutzen Licht als Energiequelle. Die Photonen werden von Lichtsammelkomplexen in den Pflanzenzellen absorbiert, und die enthaltene Energie wird zur Durchführung photosynthetischer Reaktionen verwendet. Die Absorptionsrate der Lichtsammelkomplexe hängt von der Wellenlänge ab. Die Lichtsammelkomplexe Chlorophyll a und b beispielsweise weisen eine erhöhte Absorption im roten und blauen Bereich des Spektrums auf, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Absorption von grünem Licht ist deutlich reduziert, was das grüne Aussehen der Pflanzen erklärt. Ändern sich die Absorptionseigenschaften der Pflanzenzellen, z. B. durch Wasserstress, führt dies zu einer Änderung der Zusammensetzung des reflektierten Lichts. Daher ist es möglich, den Zustand der Pflanzenzellen anhand von Änderungen der Reflexionseigenschaften zu bestimmen, indem die spektrale Zusammensetzung des von den Pflanzenblättern reflektierten Lichts gemessen wird.

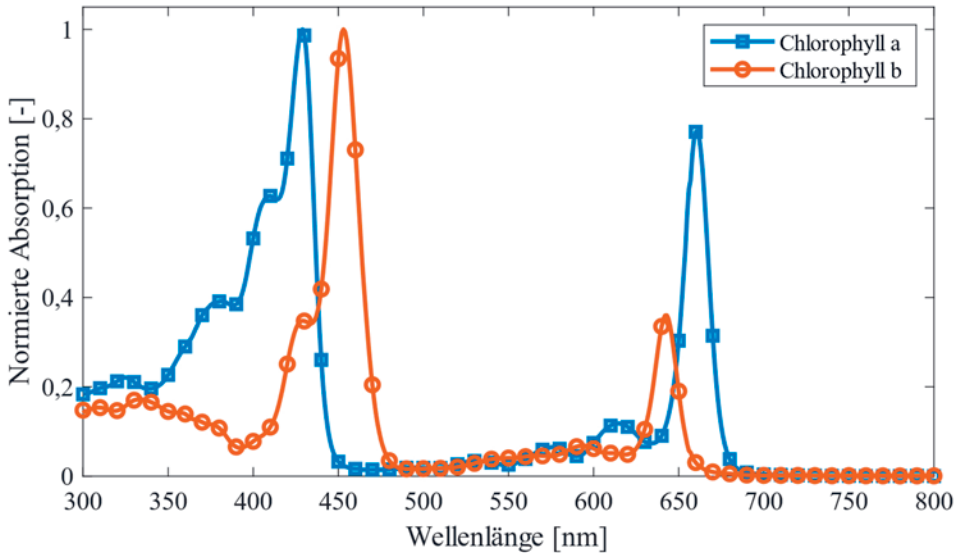


Abb. 1: Normierte Absorptionsspektren von Chlorophyll a und b, gelöst in Diethylether. (Taniguchi & Lindsey 2018)

Im Allgemeinen können die gemessenen Spektren zur quantitativen und qualitativen Bewertung von Vegetationsinformationen wie Bedeckungsgrad, Vitalität und Wachstumsdynamik verwendet werden, die in einem so genannten Vegetationsindex (VI) beschrieben werden. Je nach Untersuchungsschwerpunkt wurde unterschiedlichste VIs definiert (Xue & Su 2017). Der am häufigsten eingesetzte Index ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Dieser Index verwendet das Reflexionsvermögen im roten und infraroten Spektralbereich und kann sehr genaue Informationen über die Bedeckung und Identifizierung von Laub in einer Landschaft liefern.

Im Rahmen dieser Studie wurden Pflanzen unter definierten Laborbedingungen Trockenstress durch Wasserentzug ausgesetzt und das reflektierte Licht der Blätter mit fortschreitendem Stresslevel aufgezeichnet. Ziel war es, mit den Messdaten einen geeigneten VI zu ermitteln, der in der Lage ist, die Veränderung der Pflanzenvitalität auf Grund des Trockenstresses möglichst frühzeitig zu erkennen.

## 2 METHODE

### 2.1 MESSAUFBAU UND MESSPROZEDUR

Zur Untersuchung der Pflanzenvitalität wurde ein Messaufbau konzipiert, der die Erfassung von reflektierter und emittierter Strahlung über einen breiten Spektralbereich ermöglicht. Dazu wurden das Spektrometer AVASPEC-ULS2048CL-EVO mit einem Messbereich von 200 nm bis 1.100 nm, die Wärmebildkamera optris PI 450, die im Bereich von 7.500 nm bis 13.000 nm empfindlich ist und die HD-Webcam Logi C270 für den sichtbaren Spektralbereich eingesetzt. Als Lichtquelle diente ein Halogenstrahler mit einem breiten kontinuierlichen Emissionsspektrum.

Um das Reflexionsvermögen eines Pflanzenblattes zu quantifizieren, muss das Reflexionsspektrum einer Referenzfläche mit idealerweise 100 % Reflektivität aufgenommen werden. Das Reflexionsvermögen des Blattes wird bestimmt, indem das Reflexionsspektrum des Blattes zu dem der Referenzfläche ins Verhältnis gesetzt wird. Die Bestimmung des Referenzspektrums erfolgte einmalig zu Beginn der Messungen, da die Lichtquelle im Messaufbau hinsichtlich Lichtstärke, spektraler Zusammensetzung

zung und Position nicht verändert wurde. Für diese Messreihe wurde eine in unregelmäßigen Richtungen gefaltete und zu einer dünnen Schicht gepressten Aluminiumfolie als Reflektor eingesetzt.

Eine Beschleunigung der Trockenstressreaktion konnte erreicht werden, indem der Wasserspeicher der Pflanze minimiert und die Messungen bei erhöhter Temperatur in einer Klimakammer durchgeführt wurden. Als Versuchspflanzen wurden Daikon-Rettichsprossen verwendet, die auf einem Gitter mit einem darunter liegenden Wasserreservoir kultiviert wurden, wie in Abb. 2 auf der linken Seite zu sehen ist. Die Wurzeln der Sprossen konnten durch das Gitter in das Wasser eintauchen und die Pflanze mit Wasser versorgen. Die Abwesenheit eines feuchtigkeitsspeichernden Substrats, wie z. B. Erde, ermöglichte das schnelle Herbeiführen von Trockenstress, indem das Wasser aus dem Reservoir abgelassen wurde. Zur Beleuchtung der Pflanzen wurde ein 120 W Halogenstrahler mit einem Lichtstrom von 2.245 lm verwendet. Der Abstand zwischen Strahler und Pflanzen betrug im Mittel 65 cm, der Neigungswinkel zur Horizontalen ca. 55°. Der gesamte Messaufbau ist auf der rechten Seite von Abb. 2 dargestellt.



Abb. 2: Auf einem Gitter gezüchtete Daikon-Rettichsprossen mit darunterliegendem Wasserreservoir (links); Versuchsaufbau in der Klimakammer (rechts).

Die Temperatur in der Klimakammer wurde auf einen Wert von 35,5 °C erhöht, um einen heißen Sommertag zu simulieren. Um den Wasserverlust durch Verdunstung zu beschleunigen, wurde die relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer auf ca. 27 % abgesenkt. Die Faseroptik des Spektrometers wurde auf die Wuchshöhe der Daikon-Rettichsprossen fokussiert. Die resultierende kreisförmige Messfläche hatte einen Durchmesser von ca. 22 mm.

Das Referenz-Reflexionsspektrum wurde gemessen, nachdem sich die Temperatur in der Klimakammer eingependelt hatte, um eventuelle Veränderungen in der Empfindlichkeit des Spektrometertdetektors zu berücksichtigen. Danach wurde die Messreihe gestartet. Dieser Zeitpunkt ist in der entsprechenden grafischen Auswertung mit dem Wert 0 h gekennzeichnet. Das Reflexionsspektrum wurde alle 5 s gemessen. Parallel dazu wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer aufgezeichnet. Die Wärmebildkamera und die Webcam zeichneten im Minutentakt die Wärmeverteilung auf den Blattoberflächen und die Ausrichtung der Pflanzen auf. In den ersten 3 Messstunden wurden die Pflanzen ausreichend mit Wasser versorgt. Durch das Entfernen des Wassers aus dem Reservoir erfolgte das Auslösen von Trockenstress durch Wassermangel. Die Messungen wurden so lange fortgesetzt, bis die Pflanzen deutliche Welkerscheinungen zeigten.

## 2.2 UNTERSUCHTE VEGETATIONINDIZES

Es wurden mehrere VIs aus der Literatur betrachtet und hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber der Veränderung des Reflexionsspektrums auf Grund mangelnder Wasserversorgung bewertet.

### 2.2.1 Normalized Difference Vegetation Index – NDVI

Der NDVI war einer der ersten für die Fernerkundung eingesetzten Analyseprodukte und ist heute der am häufigsten eingesetzte VI (Huang et al. 2021). Mithilfe dieses Index können vegetationsreiche Gebiete auf der Erdoberfläche schnell identifiziert werden und Informationen über ihre Beschaffenheit gewonnen werden. Für globale Studien können beispielsweise die ermittelte Reflexionsdaten des Landsat 8-Satelliten, im Speziellen Band 4 (640 nm bis 670 nm) und Band 5 (850 nm bis 880 nm), für die NDVI-Berechnung herangezogen werden (Huang et al. 2021; Loveland & Irons 2016). Basierend auf diesen Informationen wurde der NDVI im Rahmen dieser Studie mit folgender Formel (1) berechnet:

$$NDVI = \frac{R_{850-880} - R_{640-670}}{R_{850-880} + R_{640-670}}, \quad (1)$$

### 2.2.2 Physiological Reflectance Index – PRI

Der PRI korreliert mit dem Epoxidationszustand der Pigmente des Xanthophyll-Zyklus und mit der Effizienz der Photosynthese. Wie Formel (2) zeigt, ist die mathematische Formulierung des PRI analog zum NDVI aufgebaut und verwendet die Reflexion bei 531 nm sowie bei einer Referenzwellenlänge, um Komplikationen im Zusammenhang mit tageszeitlichen Sonnenwinkeländerungen zu minimieren. In Verbindung mit anderen Methoden kann dieser Index eine verbesserte fern- und bodengestützte Schätzung der photosynthetischen Funktion ermöglichen. (Gamon et al. 1992)

$$PRI = \frac{R_{Ref} - R_{531}}{R_{Ref} + R_{531}}, \quad (2)$$

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchung wurde die Wellenlänge 570 nm als Referenzwert herangezogen.

### 2.2.3 Water Index – WI

In Untersuchungen von Peñuelas et al. (1997) wurde mit Hilfe der Reflektivität bei einer Wellenlänge von 900 nm und 970 nm auf den Wassergehalt unterschiedlicher Pflanzen wie Bäumen, Sträuchern und Gräsern geschlossen. Dabei wurde ausgenutzt, dass sich bei ca. 970 nm das Maximum einer Wasserabsorptionsbande befindet, wohin gehen bei 900 nm die Absorption deutlich reduziert ist, wie Abb. 3 zeigt. Der WI, welcher entsprechend der Formel (3) berechnet wird, zeigte laut der Arbeit von Peñuelas et al. (1997) eine starke Korrelation mit der relativen Wasserkonzentration der Pflanzen.

$$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}} \quad (3)$$

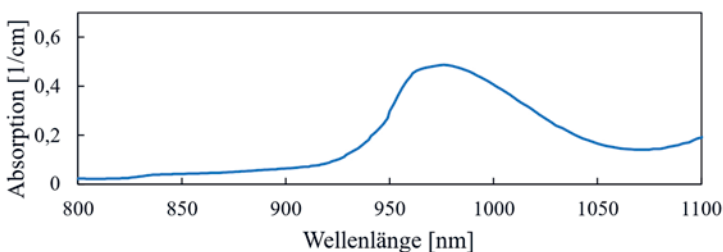


Abb. 3: Absorptionsspektrum von Wasser im Bereich 800 nm bis 1.100 nm. (Kou et al. 1993)

#### 2.2.4 Disease-Water Stress Index 4 – DWSI4

Im Rahmen einer Studie von Apan et al. (2003) wurden verschiedene VIs zur Erkennung von Zuckerrohrkrankheiten wie Rostpilzbefall formuliert. Dieser Befall verursacht Blattläsionen. Durch die aufgerissenen Blätter kann Wasser aus der Pflanze entweichen, was zu Feuchtigkeitsstress führt. Zur Berechnung des DWSI4 wird die Reflektivität bei 550 nm und 680 nm herangezogen und in Verhältnis zueinander gesetzt, wie Formel (4) zeigt. Wie in Abb. 1 zu sehen ist, befindet sich in der Nähe von 680 nm ein Absorptionspeak von Chlorophyll a, bei 550 nm hingegen ist die Absorption deutlich reduziert.

$$DWSI4 = \frac{R_{550}}{R_{680}} \quad (4)$$

### 3 ERGEBNISSE

Die gesamte Messdauer betrug etwas mehr als 9 h. Knapp 4 h nachdem das Wasserreservoir entleert und somit die Wasserversorgung der Pflanzen unterbrochen wurde, ist ein deutlicher Einsatz des Welkprozesses im Messbereich des Spektrometers ersichtlich. Abb. 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der untersuchten VIs NDVI, PRI, WI und DWSI4. Bilder im sichtbaren Bereich sowie Bilder der Wärmebildkamera zum Zeitpunkt der Entleerung des Wassertanks, des Einsetzens des Welkprozesses und des Krümmens der Pflanzen auf Grund des fortgeschrittenen Welkprozesses sind in Abb. 5 dargestellt.

Die mittels Kamera durchgeführte Zeitrafferaufnahme zeigt, dass sich die Position der einzelnen Sprossen auch vor dem Entleeren des Wasserreservoirs zeitlich änderte. Diese Bewegung führte zu einer Änderung der Bedeckung im Messbereich des Spektrometers, welche in der Fluktuation des NDVIs ersichtlich ist. Eine signifikante Änderung des NDVIs ist nach einer Gesamtmesszeit von 8,5 h erkennbar und ist auf das weit fortgeschrittene Welken und dem damit verbundenen Krümmen der Pflanzen zurückzuführen.

Eine ähnliche Beobachtung kann beim zeitlichen Verlauf des PRIs gemacht werden, wobei der monotone PRI-Anstieg ca. 20 min vor dem monotonen Abfall des NDVIs einsetzt. Im Unterschied zum NDVI weist der Verlauf des PRIs bis zum monotonen Anstieg kaum Fluktuationen auf.

Zum Zeitpunkt des Einsetzens des Welkprozesses zeigt der WI einen langsamen Anstieg, welcher sich nach 8 h Gesamtmesszeit deutlich beschleunigt. Nach einem steilen Anstieg ist bei einer Gesamtmesszeit von 8,5 h eine Abnahme des WIs ersichtlich. Zu diesem Zeitpunkt krümmen sich die Pflanzen merklich und die hellen, leicht rötlichen Stängel unter den Blättern haben einen größeren Anteil an der Lichtreflexion, welches die Änderung des Monotonieverhaltens des WI-Verlaufes erklären kann.

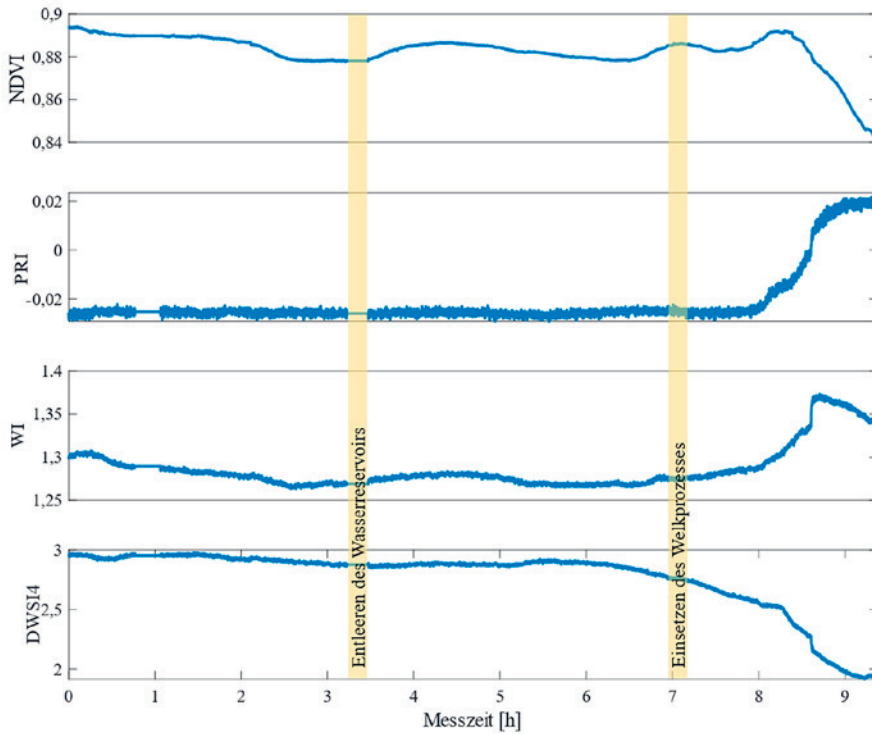


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der VI NDVI, PRI, WI und DWSI4 sowie Markierung der Entleerung des Wasserbehälters und des Beginns des Welkprozesses im Messbereich des Spektrometers.

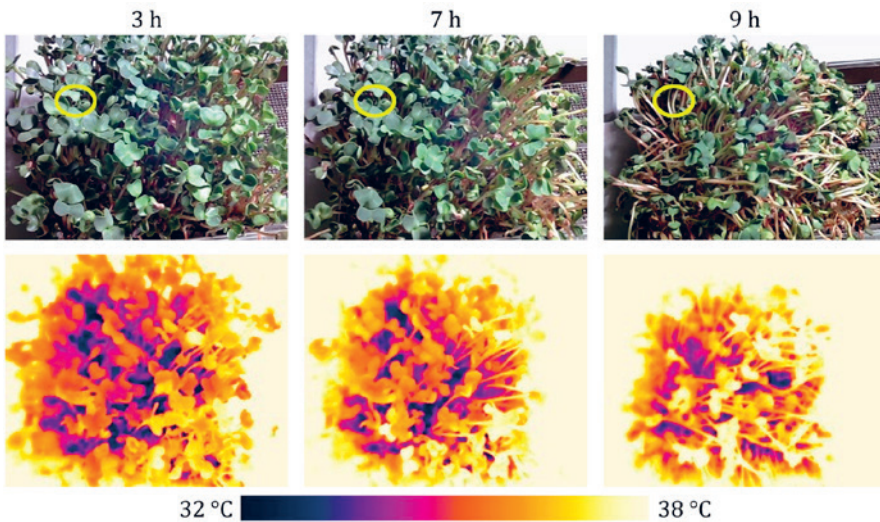


Abb. 5: Bilder der Pflanzen (sichtbarer Bereich (oben) und Wärmebild (unten)) 3 h, 7 h und 9 h nach Beginn der Messung. Der Ring in den oberen Bildern markiert den Messbereich des Spektrometers.

Im Gegensatz zu all den bisher betrachteten VIs, weist der DWSI4 bereits vor dem optisch erkennbaren Welkprozess einen Abfall auf. Unter Berücksichtigung der Fluktuation des DWSI4 vor dem Einsetzen des monotonen Abfalls ist eine signifikante Änderung des DWSI4 ca. 30 min vor dem Einsetzen des Welkprozesses erkennbar. Somit ist es mit diesem VI möglich basierend auf der Messung des Reflexionsspektrums der Pflanzen den in Kürze beginnenden Welkprozess der Pflanzen frühzeitig zu detektieren.

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Studie wurde ein berührungsloses Messverfahren zur Bestimmung der Pflanzenvitalität durch Messung der spektralen Zusammensetzung des von den Pflanzenblättern reflektierten und emittierten Lichtes untersucht. Die Spektren wurden mit Hilfe unterschiedlicher Vegetationsindizes ausgewertet. Als Messobjekt dienten Daikon-Rettichsprossen, die Trockenstress auf Grund von Wasserentzug ausgesetzt waren. Alle untersuchten VIs (NDVI, PRI, WI, DWSI4) zeigten eine signifikante Änderung bei Krümmen der Pflanzen auf Grund des weit fortgeschrittenen Welkprozesses. Mit Hilfe des VIs DWSI4 war es möglich den bevorstehenden Beginn des Welkens der Pflanzen bereits eine halbe Stunde vor dem Eintreten zu detektieren. Die ausgewerteten Daten können zum Beispiel dazu verwendet werden, ein Bewässerungssystem zu regeln, um eine stets ausreichende Wasserversorgung bei minimalem Ressourceneinsatz zu ermöglichen. Die zur Berechnung des DWSI4 betrachteten Wellenlängen liegen im sichtbaren Bereich. Für eine praktische und kostengünstige Anwendung kann somit anstelle eines kostenintensiven Spektrometers ein Kameramodul in Kombination mit passenden Bandfiltern eingesetzt werden. Für zukünftige Untersuchungen dienen die Messdaten und die in dieser Studie mit Daikon-Rettichsprossen gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage und können für andere Pflanzen, die typischerweise bei der Fassadenbegrünung in der Praxis verwendet werden, angepasst werden.

#### LITERATUR

- Apan A., Held A., Phinn S. & Markley J. (2003) Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 hyperion imagery for discriminating sugarcane disease.
- Gamon J. A., Peñuelas J. & Field C. B. (1992) A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 0034-4257 1, pp. 35-44.
- Huang S., Tang L., Hupy J. P., Wang Y. & Shao G. (2021) A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research* 1007-662X 1, pp. 1-6.
- Kou L., Labrie D., & Chylek P. (1993) Refractive indices of water and ice in the 065- to 25- $\mu$ m spectral range. *Applied Optics* 0003-6935 19, pp. 3531-3540.
- Loveland T. R. & Irons J. R. (2016) Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy. *Remote Sensing of Environment* 0034-4257, pp. 1-6.
- Peñuelas J., Pinol J., Ogaya R. & Filella, I. (1997) Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 0143-1161 13, pp. 2869-2875.
- Taniguchi M. & Lindsey J. S. (2018) Database of absorption and fluorescence spectra of >300 common compounds for use in PhotochemCAD. *Photochemistry and Photobiology* 0031-8655 2, pp. 290-327.
- Xue J. & Su B. (2017) Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors* 1687-725X, pp. 1-17.



# In-situ Delaminationsmessung in Mehrlagenstrukturen der Elektronik

T. Walter, G. Khatibi

*Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien, Wien, Österreich*

**ABSTRACT:** Zur Erstellung robuster Lebensdauermodelle für Mehrlagensystem in der Elektronik ist die Erkennung von Rissentstehung und Delamination durch zyklische Belastungen, wie sie im Betrieb auftreten, von großer Bedeutung. In dieser Studie wurde eine zerstörungsfreie, in-situ-Technik zur Risserkennung und Risswachstumsüberwachung für Halbleiterstrukturen auf Basis der Laser-Doppler-Vibrometrie entwickelt und für die Untersuchung der Degradation an großflächigen Lotverbindungen, die in moderner Leistungselektronik verwendet werden, angewandt. Die in-situ Delaminationsmessungen wurden an Halbleiterstrukturen bestehend aus Chip/Die-Attach/Substrat während eines hochbeschleunigten mechanischen Wechselbiegeversuchs durchgeführt. Zur Verifikation der quantitativen Ergebnisse wurde komplementär den Degradationsgrad und des Rissverlaufes durch Ultraschall-Mikroskopie (SAM) Messungen sowie mittels optischer Methoden durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Mikrostruktur der Lotschichten mittels Raster-Elektronenmikroskopie (REM) charakterisiert. Die in-situ Methode zur Delaminationserkennung kann wesentliche Informationen für Materialsysteme in modernen Halbleiterkomponenten liefern und als effiziente Screening-Methode für innere Schädigungen dienen.

## 1 EINLEITUNG

Die zunehmende Nachfrage nach Hochleistungs-Halbleiterbauelementen, insbesondere in Branchen wie der E-Mobilität und bei erneuerbaren Energien, hat zur Entwicklung von Modulen mit höherer Leistungsdichte, Betriebsfrequenz und Integration geführt (Wang et al. 2012). Bei der Herstellung und im späteren Betrieb treten in solchen mehrschichtigen elektronischen Bauteilen Spannungen auf, die auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien zurückzuführen sind. Längerfristig können dabei die thermomechanischen, zyklischen Beanspruchungen zur Bildung und Ausbreitung von Rissen, und schließlich zu Ermüdung und Versagen an den Schwachstellen der elektronischen Komponenten führen. Bekanntermaßen stellen dabei großflächige Lötverbindungen, die neben Bonddrähten, die wichtigsten elektrischen, mechanischen und thermischen Verbindungen zwischen Chips, Substrat und Grundplatte ausmachen, die größten Schwachstellen dar. Dies hat sich in den letzten Jahren, durch das verstärkte Aufkommen SiC-basierte Technologien und der Notwendigkeit bleifreier Alternativen als Lötmaterialien einzuführen, noch zusätzlich verschärft (Menon et al. 2015).

Um die geforderte Lebensdauer dieser Verbindungen zu gewährleisten und den wachsenden Bedarf an virtualisierten Qualifikationsmethoden zu decken, ist es unerlässlich, detaillierte Informationen über deren Verhalten unter zyklischen Belastungen zu ermitteln. Das Wissen über Rissbildung, -ausbreitung und Degradation ist entscheidend für das Verständnis der Ermüdungsmechanismen von Materialien. Während ex-situ Techniken wie Ultraschall-Mikroskopie (SAM), Computertomographie (CT), thermische Widerstandsmessungen (Li 2021) oder Puls-Phasen-Thermographie (May et al. 2012) für die Analyse von Delaminationen und die Detektion von Ausfällen elektronischer Komponenten zur Verfügung stehen, ist die Entwicklung effektiver und zuverlässigerer Methoden für die zerstörungsfreie in-situ Detektion und Überwachung von Delaminationen und Rissbildungen vor dem endgültigen Ausfall ein wichtiger Bereich aktueller Forschungsthematiken. Dies kann notwendige Informationen für präzise Lebensdauerprognosemodelle liefern, die den realen Bedingungen genau entsprechen. Insbesondere

da es wichtig ist, die durch das Aufeinandertreffen verschiedener Technologien und Materialkombinationen und die damit verbundenen unterschiedlichen Versagensmoden in einem frühen Stadium der Entwicklungsphase eines Produkts erkennen zu können.

Isotherme mechanische Ermüdungstests haben sich als zuverlässige Methode für die Materialentwicklung erwiesen und wurden als Alternative zu thermischen Zyklen für beschleunigte Lebensdauerbewertung von Lotverbindungen vorgeschlagen (Betzwar Kotas et al. 2017; Lederer et al. 2020, Lederer et al. 2023). In früheren Studien wurde ein hochbeschleunigtes, mechanisches Ultraschallprüfsystem auf Basis der Dreipunktbiege (3PB) Methode zur Untersuchung des Ermüdungsverhalten von großflächigen Lötverbindungen an Halbleiter Modellstrukturen eingesetzt. In dieser Arbeit wird nun eine neuartige, zerstörungsfreie Prüftechnik auf Basis von Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) vorgestellt, um die in-situ Rissbildung und Ausbreitung der Delamination entlang der Grenzflächen in Chip/Substrat-Lotverbindungen bei solchen Ermüdungstests vor dem „End-of-Life“ zu detektieren. Diese Methode wurde in Kombination mit isothermen Ermüdungstests bei 175 °C an einer Reihe von speziell konzipierten Chip/Lot/Direct bonded copper (DBC) Modellteststrukturen durchgeführt. Optische Untersuchungen zur Erkennung der Rissbildung und Messung der Delamination unter Verwendung von Ultraschall-Mikroskopie wurden durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen der Änderung des Vibrationsverhaltens des Systems und dem delaminierten Bereich zu korrelieren. Schließlich wurde eine zerstörende Scherprüfung mit anschließender Analyse der Bruchfläche beziehungsweise eine Untersuchung der metallografischen Querschnitte der ermüdeten Proben durchgeführt, um den Schädigungsgrad in den Lotverbindungen zu bestimmen. Die vorgeschlagene Methode kann als zuverlässige und genaue Technik für die Echtzeitmessung des Delaminationsrisswachstums in einer Vielzahl von mehrschichtigen Strukturen eingesetzt werden.

## 2 EXPERIMENTE

### 2.1 PROBENDESIGN

Für die Ermüdungsexperimente wurden Modellteststrukturen entworfen, die der Schichtstruktur von Leistungsmodulen entsprechen (Abb. 1). Metallisierte Si-Chips (5x5 mm) wurden mit SnAg- und SnSb-basierten Lotpasten, welche als bleifreie Alternativen in solchen Bauteilen vermehrt zum Einsatz kommen, auf einem handelsüblichen DBC-Substrat (25x10 mm) mit einer Schichtstruktur von Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu (300/630/300 µm) gelötet. Die durchschnittliche Dicke der Lötsschicht betrug dabei etwa 100 µm. In früheren Studien wurde festgestellt, dass die Probengeometrie einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der zyklischen Biegeermüdungstests bei 20 kHz hat. Um die Rissausbreitung der Lötsschicht zu fördern, und großflächigere Delamination zu ermöglichen, wurde eine Geometrie gewählt, bei der der Chip 45° bezüglich des Substrats verdreht ist (siehe Abb. 1 (b)). Dies erzeugt Spannungskonzentrationen an den Ecken des Chips während der 3PB-Tests mit einer Erhöhung der plastischen Dehnung im Vergleich zum konventionellen Design, wie durch Finite Elemente (FE)-Analyse bestimmt wurde.

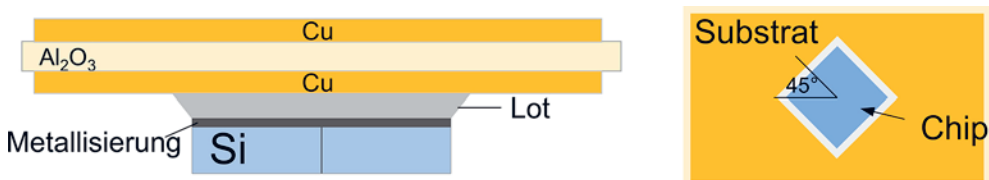


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Probenstruktur im (a) Querschnitt bzw. (b) in Draufsicht.

## **2.2 ULTRASCHALL ERMÜDUNGSSYSTEM**

Die beschleunigten Ermüdungsversuche wurden mittels eines Ultraschall-Resonanzprüfsystem durchgeführt, das aus einer Stromversorgung, einem piezoelektrischen Wandler, einem akustischen Horn mit Spitze und der Probe besteht, wie schematisch in Abb. 2(a) dargestellt ist. Die Schwingungsanregung einer longitudinalen Vibration bei 20 kHz erfolgt im Piezo-Wandler und wird durch das Horn beziehungsweise passende Kopplungsstücke verstärkt. An der Stelle maximaler Auslenkung wird das System mittels der 3PB-Spitze des Horns an die Probe gekoppelt. Diese muss geometrisch so dimensioniert werden, dass es bei 20 kHz zur Ausbildung einer stehenden transversalen Schwingbewegung kommt.

Die statischen und zyklisch eingebrachten Lasten konnten mittels eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers, der unter den Auflagern der 3PB Vorrichtung angebracht ist, gemessen werden. Eine statische Vorlast, die bei den Messungen etwa 10 N betrug, ist erforderlich, um während der Schwingungsanregung einen ständigen Kontakt der 3PB-Spitze mit der Probe zu gewährleisten. Die Schwingungsmodi und die Auslenkungsamplitude der Probe während der Anregung wurden mit einem Laser-Doppler-Vibrometer bestimmt.

## **2.3 IN-SITU DELAMINATIONSMESSUNG**

Der Aufbau der zerstörungsfreien, in-situ Vibrometer-Messung während der zyklischen 3PB-Versuche ist in Abb. 2(b) dargestellt. Die Einrichtung besteht aus einem Laser-Doppler-Vibrometer, um die Auslenkungsamplitude der Probe, die in einem transversalen Resonanzmodus bei 20 kHz schwingt, zu bestimmen. Zwei separate Messpunkte werden durch 90° Umlenkspiegel an die Ecken des Chips gerichtet.

Sobald nun Risse, aufgrund des Spannungsüberhöhung an den Ecken des Si-Chips, zu wachsen beginnen, erhöht sich die Auslenkungsamplitude des Vibrometer-Signals an der entsprechenden Ecke im Vergleich zur Auslenkung bzw. der Grundschwingung des Substrats. Diese Zunahme erhöht sich bei Rissausbreitung stetig, bis der Test gestoppt wird oder der Chip vollständig delaminiert ist. Die in-situ Delaminationserkennung wurde auf die oben beschriebenen Probensysteme angewandt, um den Zeitpunkt der Rissentstehung sowie die Delaminationsrate zu bestimmen. Die Ermüdungstests wurden unter isothermen Bedingungen bei 175 °C durchgeführt um die Schädigungen der Lotverbindungen unter hohen Belastungen, denen Leistungsmodule im Betrieb ausgesetzt sein können, nachzustellen. Zur Erwärmung der Proben während der Prüfung wurde dabei ein Heißluftgebläse eingesetzt.

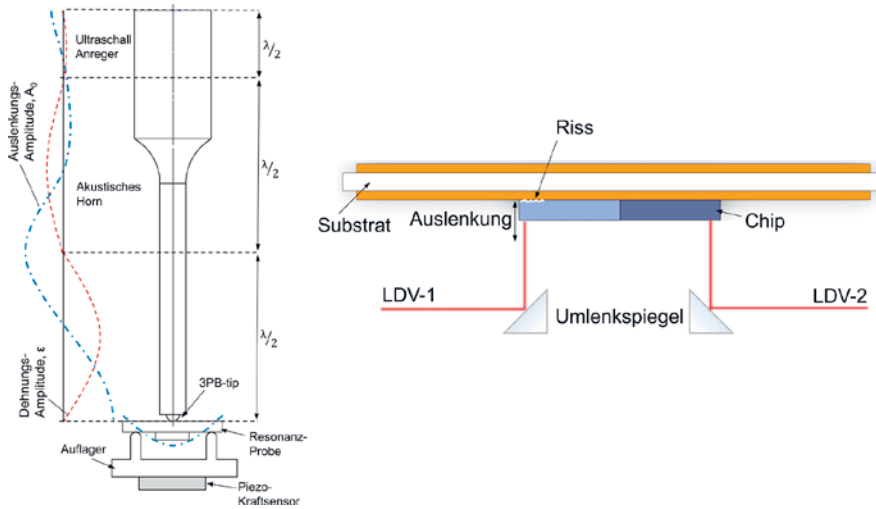


Abb. 2: (a) Schematischer Aufbau des Ultraschall Ermüdungssystems bzw. der (b) in-situ Delaminationsmessung basierend auf Laser-Doppler Vibrometrie.

## 2.4 ULTRASCHALL MIKROSKOPIE (SAM)

Ultraschall-Mikroskopie ist ein anerkanntes Instrument für die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle, Inspektion und Fehleranalyse bei mikroelektronischen Komponenten und Materialien. Mithilfe hochfrequenter Ultraschallwellen können sehr präzise Informationen über inhomogene Bereiche im Inneren des Materials wie Delamination, Hohlräume oder Rissausbreitung gewonnen werden.

Vor und nach der Ermüdungsprüfung wurden alle Probenserien mittels Ultraschall Mikroskopie untersucht, um die durch das Ermüdungsrisswachstum delaminierte Fläche zu bestimmen.

## 2.5 SCHERPRÜFUNG

Im Anschluss an die SAM Untersuchungen wurde eine Auswahl der Proben einem Scherfestigkeitstest unterzogen, der eine Bruchflächenanalyse ermöglicht und Informationen über den Bruchmodus und den Rissausbreitungspfad liefert. „Die-shear“ Tests werden bei der Untersuchung der mechanischen Zuverlässigkeit elektronischer Bauteile eingesetzt, um die Haftfestigkeit eines Halbleiterchips auf dem Substrat zu bestimmen. Obwohl Scherfestigkeitstests in der Theorie relativ einfach durchzuführen sind, verursachen die Sprödigkeit des Siliziums, die vergleichsweise große Oberfläche und die damit verbundenen hohen Belastungen einige Schwierigkeiten in der praktischen Umsetzung. Um die Belastung auf das Si zu reduzieren, wurden die Tests daher bei erhöhter Temperatur ( $T=150\text{ °C}$ ) durchgeführt.

# 3 ERGEBNISSE

## 3.1 DELAMINATIONSMESSUNGEN

Die Ergebnisse der in-situ Delaminationsmessung sind in Abb. 3 anhand zweier exemplarischer Kurven der Auslenkungsamplitude gegen die Zyklenzahl dargestellt und den SAM Bildern der delaminierten Flächen gegenübergestellt. Im ersten Fall geht die Erhöhung der Auslenkungsamplitude auf beiden Seiten mit symmetrischem Risswachstum an beiden Ecken des Si-Chips einher. Das zweite Beispiel zeigt eine einseitige Delamination im SAM-Bild mit einer starken Erhöhung der Auslenkungsamplitude der entsprechenden Vibrometer-Messungen, während die Amplitude am anderen Eck während der Versuchsdauer konstant bleibt. Asymmetrisches Delaminationsverhalten kann auf prozessbedingte Qualitätsunterschiede der Lotverbindungen (Poren, Dicke etc.) bzw. kleine Abweichungen von der zen-

tralen Positionierung des Si-Chips zurückgeführt werden.

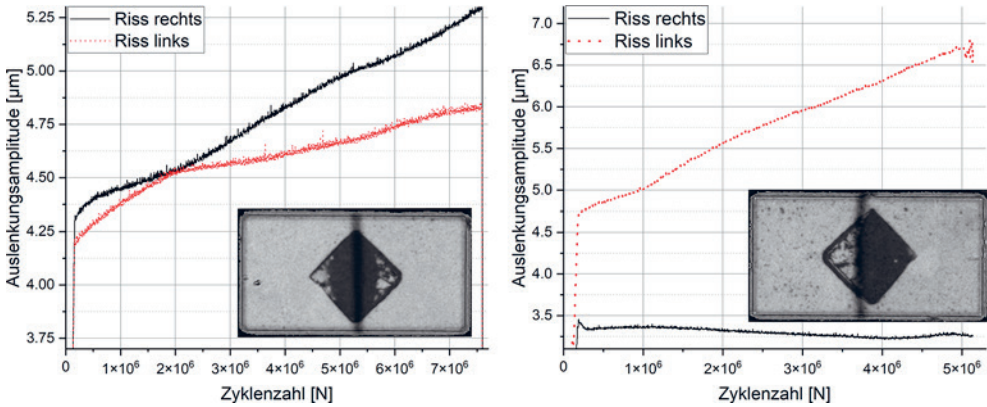


Abb. 3: Beispiele für (a) beidseitiges und (b) einseitiges Risswachstum, SAM-Bilder (helle Bereiche zeigen Delamination) und die entsprechenden Diagramme.

Mehrere Proben beider Arten von Lotverbindungen wurden für eine verschiedene Anzahl von Zyklen getestet, und der durch Vibrometer-Messungen gemessene relative Anstieg der Auslenkungsamplitude wurde gegen die durch die SAM-Bilder bestimmte delaminierte Fläche aufgetragen (Abb. 4). Eine Fläche von 50 % entspricht dabei vollständiger Delamination der jeweiligen Chiphälfte. Die Korrelation zwischen dem Vibrometer-Signal und der delaminierten Fläche kann dabei klar identifiziert werden. Nach Erstellung einer Kalibrationskurve für die jeweilige Teststruktur erlaubt diese Methode also in-situ Untersuchungen von Rissinitiation und der Delaminationsrate für eine gegebene Probengeometrie. Der Zusammenhang der Änderung der Schwingungsamplitude zur delaminierten Fläche kann alternativ auch durch FE-Simulation ermittelt werden.

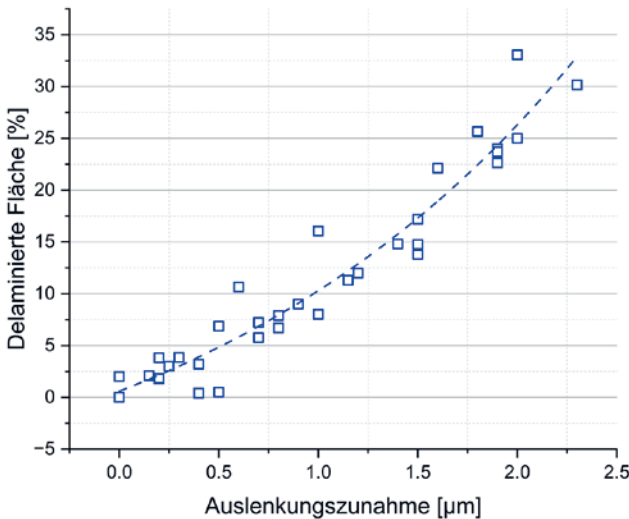


Abb. 4: Beziehung zwischen der delaminierten Fläche und der relativen Auslenkungszunahme.

Der Vergleich der delaminierten Fläche zwischen den SAM-Messungen und der Auswertung der „Die-shear“ tests liefert sehr ähnliche Ergebnisse, wie in dem in Abb. 5 präsentierten Beispiel dargestellt ist.

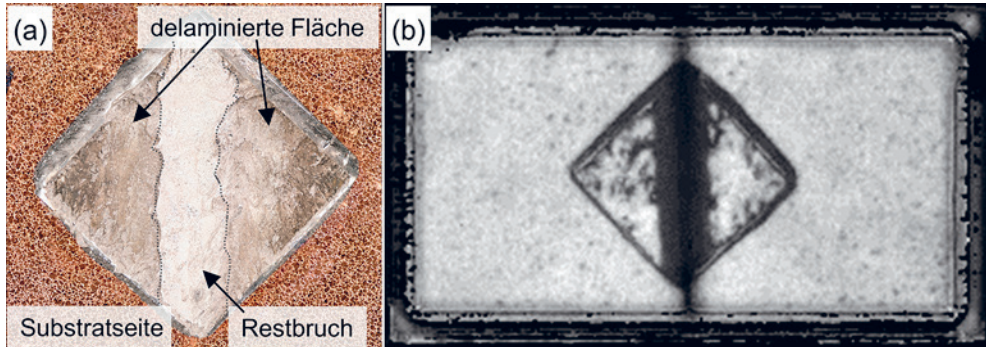


Abb. 5: (a) Bruchflächen des ermüdeten SnAg-Lots auf der Substratseite nach dem Schertest mit (b) dem entsprechenden SAM-Bild (helle Bereiche zeigen Delamination).

### 3.2 SCHADENSANALYSE

Die sichtbare Risslänge entlang der Kante des Si-Chips, beginnend an der Ecke, sowie die durch die Ermüdung veränderte Oberflächentopographie der Lote sind in REM-Aufnahmen ersichtlich (Abb. 6). Die Bestimmung der Delaminationslänge entlang der Chip-Seitenkante kann ebenfalls mit guter Übereinstimmung zur Abschätzung der delaminierten Fläche herangezogen werden.

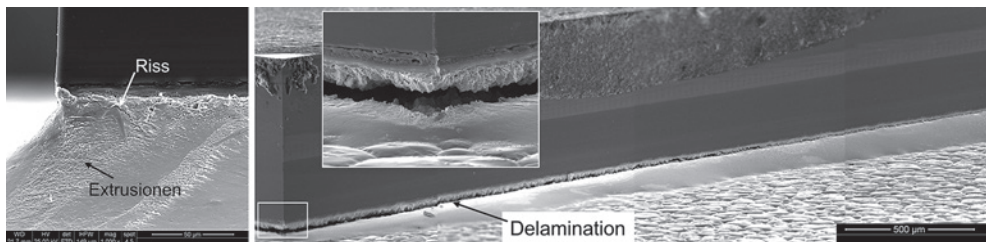


Abb. 6: (a) Starke plastische Verformung und Ermüdungsrissbildung in der Lötverbindung bei SnAg (b) Ermüdungsrissbildung an der Ecke des Chips und entlang der Grenzfläche bei SnSb.

Um das Delaminationsverhalten zu bewerten, wurden metallographische Schlitte der ermüdeten Proben präpariert und die Querschnitte mittels REM untersucht. Die Ergebnisse, die in Abb. 7(a) dargestellt sind, zeigen einen typischen Rissverlauf, der in der Nähe der Ecke der Chip/Lötverbindungs-Grenzfläche entsteht und sich in Richtung des DBC-Substrats ausbreitet. Der Riss folgt dann hauptsächlich der Grenzfläche zwischen Lotverbindung und der Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> intermetallischen Phasen (IMC).

Beispiele der Ermüdungsbruchflächen der Lötstellen nach den Schertests, die in Abb. 7(b) dargestellt sind, zeigen ebenfalls einen Ermüdungsrisspfad der Zunächst innerhalb des Lots und anschließend nahe der IMC-Schicht auf der Rückseite des Chips verläuft.

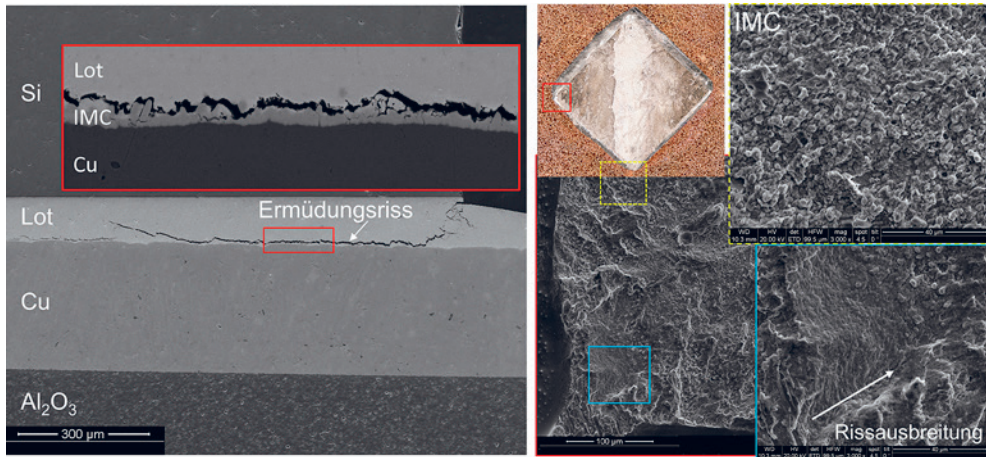


Abb. 7: (a) REM-Mikrografie der SnSb-Lötverbindung nach Ermüdungsprüfung zeigt Risswachstum entlang der Lötverbindungs/IMC-Grenzfläche. (b) REM-Bilder der Ermüdungsbruchflächen der DCB-Seite einer SnSb-Lötverbindung, nach dem abscheren. Der Ermüdungsriss zeigt einen gemischten Versagensmodus.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Studie wurde ein zerstörungsfreies in-situ-Verfahren entwickelt, das basierend auf Laser-Doppler-Vibrometrie bei beschleunigten mechanischen Ermüdungstest angewandt werden kann um Rissbildung und Risswachstum in Halbleiterstrukturen zu erkennen.

Wir haben diese Methode bei isothermen Ermüdungstests von großflächigen SnSb- und SnAg-Lotstellen wie sie häufig in Leistungshalbleitern verwendet werden, angewandt. Die Ergebnisse bestätigen, dass diese Technik für die Bewertung des Schädigungsgrades geeignet ist und als zuverlässige Screening-Methode zur Erkennung von Rissbildung dienen kann.

In Kombination mit FE-Simulationen oder ergänzenden Messungen des delaminierten Fläche kann mit dieser Methode der Delaminationsgrad für eine definierte Struktur in-situ quantitativ bestimmt werden.

Die in-situ-Vibrometer-Messtechnik hat sich als zuverlässige und genaue Methode zur Ermittlung der wesentlichen Materialeigenschaften erwiesen, die für die Entwicklung robuster Modelle zur Vorhersage der Lebensdauer erforderlich sind.

Die in dieser Studie demonstrierte Methode kann auf eine Vielzahl von mehrschichtigen Strukturen angewendet werden.

## LITERATUR

- Betzwar Kotas A., Khatibi G. (2017) Isothermal bending fatigue response of solder joints in high power semiconductor test structures. *Microelectronics Reliability*, Vol. 76–77, pp. 357-361.
- Lederer M., Betzwar Kotas A., Khatibi G. (2020) A lifetime assessment and prediction method for large area solder joints. *Microelectronics Reliability*, Vol. 114.
- Lederer M., Betzwar Kotas A., Khatibi G. (2023) Lifetime modelling of solder joints based on accelerated mechanical testing and Finite Element Analysis. *Power Electronic Devices and Components*, Vol. 4.

- Menon S., Georg E., Osterman M., Pecht M. (2015) Overview of high lead solder (over 85%) in the electronics industry. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, Vol. 26, pp. 4021–4030.
- Li Z., Fushinobu K., Haketa H., Yasui R., Shinoda T. (2021) In-situ diagnosis of solder joint failure by means of thermal resistance measurement. *Microelectronics Reliability*, Vol. 123.
- Wang H., Ma K. and Blaabjerg F. (2012) Design for reliability of power electronic systems,” *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 33-44
- May D., Wunderle B., Schacht R. and Michel B. (2012) Transient thermal analysis as failure analytical tool in electronic packaging. *Proc. 13th Eurosim Conf.*

# Benefits and Challenges for Location-Based Services using Visible Light Technologies

C. Krutzler, A.P. Weiss, A. Kröpfl

*JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, MATERIALS – Institute for Sensors, Photonics and Manufacturing Technologies, Smart Connected Lighting, 7423 Pinkafeld, Industriestraße 6, Austria*

**ABSTRACT:** Digitalization and artificial intelligence are becoming increasingly important, thus also enabling new functionalities in the building technology sector. Both trends are contributing to an Internet of Things (IoT) that aims to connect information from a variety of sensors and actuators in real time to deliver data to and from any location of use. This also relates to the buzzword “location-based services”. Sensor networks and sensors that can provide such functionality are typically based on cameras and RF technologies like Wi-Fi. However, limited bandwidth and privacy concerns for example give reason to investigate other solutions as well. The focus of this work is on Visible Light Technologies that can provide options for indoor communications, sensing, and localization, and complement conventional technologies to fully exploit the potential of sensor networks in the IoT. In particular, Visible Light Communication (VLC) and Visible Light Positioning (VLP) are studied in this work for relevant applications in smart buildings. Initial experimental results are presented and demonstrate the potential for solutions that can work under changing parameters and environmental conditions.

## 1 INTRODUCTION

In offices and public buildings, recording the number of people present can be beneficial for modern building automation. In addition to lighting control, parameters for climatization such as temperature (heating/cooling) and ventilation could be better and continuously adapted to actual demand, thus also contributing to the efforts for energy efficiency and sustainability. Furthermore, buildings are also expected to offer new functionalities and services based on information technology, which require indoor sensor networks for data communication (keyword Internet of Things – IoT). Strong growth is expected for location-based services, which refers to the provision of information based on the user’s position. However, depending on the application, this in turn requires sufficiently precise positioning. For the outdoor area, GPS provides an established solution, but for indoor applications, various technologies are still being investigated in this regard. Conventional technologies such as RF-based Wi-Fi or Bluetooth systems may reach their limits in terms of bandwidth or sensitivity towards interferences, triggering the search for alternatives. This contribution presents Visible Light Technologies for indoor data transmission and position determination. These approaches can mitigate some of the challenges associated with conventional technologies and complement them to realize the full potential of modern information technology. For building applications in particular, these technologies could provide solutions for cost-effective deployment, as they can be combined with or integrated into existing lighting infrastructure.

## 2 STATE OF THE ART

Several technologies are available for implementing indoor sensor networks for data transmission and location-based services. One of the main categories is radio frequency (RF) based technologies such as Wi-Fi, Bluetooth, or RFID (Kunthoth et al. 2020). In addition, many other signals have been studied,

of which Inertial Measurement Units (IMUs), image-based systems, and light-based technologies are among the most common. IMUs combine accelerometers, gyroscopes, and magnetometers into a single device to determine actual motion (Lu et al. 2019). They are cheap and widely used since their integration into smartphones. However, IMUs can only provide relative position changes and are susceptible to drift effects.

At least in newly constructed buildings, RF technologies are already provided for and integrated into the infrastructure, making them the first choice in many cases. However, limited bandwidth and sensitivity to interference can sometimes pose challenges for broader application. Image-based systems entail higher system costs and greater signal processing overhead and they are also associated with strong privacy concerns. Therefore, the next section discusses in more detail visible light-based technologies that can complement these conventional approaches and mitigate some of their problems.

Finally, a discussion of the state of the art for indoor sensor networks would be incomplete without mentioning the rapidly advancing methods for machine learning (ML) algorithms. They have become an indispensable tool for processing and handling the large amounts of data in sensor networks and are widely used for signal processing and data analysis, including, e.g., indoor location (Nessa et al. 2020; Bellavista-Parent et al. 2022). ML is commonly used in combination with visible light technologies (Chen et al. 2019), providing solutions for handling a wide range of changing parameters and environmental conditions.

### 3 VISIBLE LIGHT TECHNOLOGIES

The rise of LED-based lighting systems is a key driver for the investigations of visible light technologies for interior sensor networks (Feezell & Nakamura 2018). The ability to combine existing interior lighting with functions for data communication (Visible Light Communication - VLC), sensing (Visible Light Sensing - VLS), and localization (Visible Light Positioning - VLP) while keeping deployment costs low is seen as one of the key benefits (Nassar & Abdulaziz 2019). The LED as an opto-electronic component can be easily integrated into and controlled by electronic circuits, enabling precise and tailored operation. In addition to the LED as a transmitter, CMOS camera sensors and photodiodes (PDs) are often used as receiver elements to detect the locally varying light intensity or its spectral distribution. PDs and even RGB PDs, which offer three separate analogue channels with sensitivities in the red, green and blue regions of the electromagnetic spectrum, are now available at very low cost.

VLC refers to data transmission between an LED and a photosensitive device by modulating the emitted light and demodulating the light detected by the receiving component. In this process, the modulation frequencies used are well above the perception threshold of the human eye, so that high-quality illumination without flicker is maintained in parallel with the data transmission (Rehman et al. 2019).

The basic concepts of VLS and the related VLP are to analyze the light intensity and/or spectral composition of light incident on a photosensitive device to derive information from the environment or a specific element placed in its field of view. For visible light technologies, it is important to distinguish between line-of-sight (LoS) and non-line-of-sight (nLoS) configurations (Wang & Zuniga 2017), where LoS refers to configurations without additional reflections or obstacles between the transmitter and receiver, and nLoS obviously means the opposite. In general, LoS configurations provide better performance due to the higher signal strength, but nLoS may have the advantage that the receiving photosensitive device does not need to be placed on the object of interest. Thus, the light source and receiving element can be placed in close proximity to each other and integrated into the same housing, such as a luminaire. These nLoS configurations are often also referred to as backscattered systems because the information derived from the object or a person is based solely on reflected light.

In summary, visible light technologies can provide options for secure and privacy-preserving data communication and/or sensing tasks since visible light does not penetrate walls. In addition, these technologies do not suffer from RF interference and can be implemented into an existing infrastructure with low-cost standard components.

#### 4 INVESTIGATED VLC/VLP APPROACHES FOR LOCATION-BASED SERVICES

To demonstrate the capabilities of VLC technologies for indoor sensor network functions, a test setup was developed, assembled, and experimentally evaluated. Fig. 1 shows a schematic representation of this test configuration. A commercial desk lamp was modified so that the integrated white-light LED sources are controlled by a microcontroller board (Nucleo-G431KB, STMicroelectronics) to transmit data to a servo motor (Parallax Feedback 360° High-Speed Servo) located in the light cone below the desk lamp. A photodiode (PD, Osram SFH2701) was used as the photosensitive receiver on the servo motor and the optical signals were demodulated by a second Nucleo microcontroller. This configuration refers to a LoS setup, as the emitted light directly reaches the PD.

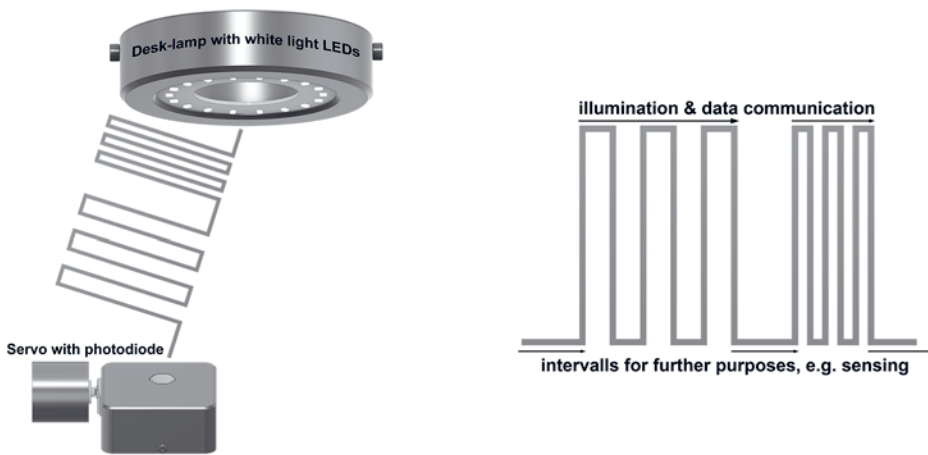


Fig. 1: Schematic of the experimental setup for data transmission by VLC (left). A commercial lighting system (LED desk-lamp) is modified and used to transmit commands to a photodiode (PD) receiver to control a servomotor in parallel with the lighting function. Right picture: schematic diagram showing the principle of frequency modulation of a LED light source.

Data transmission is performed by frequency modulation of the transmitting LED light sources. For modulation of LED light intensity, frequencies in the range of 500 Hz to 700 Hz are used, which cannot be perceived by the human eye and therefore ensure high quality and undisturbed lighting without flickering. Here, different frequencies symbolize different commands to the servo and Fig. 1 on the right shows the principle of this modulation scheme. In this way, illumination and data transmission are performed in parallel and can even be interrupted by intervals for additional purposes such as sensing functions with the desk lamp. This frequency modulation method allows for easy implementation without the need to use more complex protocols or coding schemes. In Fragner et al. (2022) this approach was extended to realize a closed-loop controller based solely on VLC and VLS, thus representing a so-called Integrated Sensing and Communication (ISAC) system.

For the purpose of localizing objects or people indoors, two additional test scenarios were designed that represent complementary approaches to position determination. In the first scenario, the objects of interest are not modified, i.e. they remain “as is” and do not need to be equipped with special active or passive components for detection. This approach takes advantage of the variations in light reflections caused by the objects at different positions in the room and detected by PD receivers. In this case, the

detectors can be integrated into the existing room lighting. For this purpose, a setup with 6 PDs distributed over the surface of a standard luminaire was developed to detect the light reflected from the room area below. The scenario covers a floor area of about 4 m x 2 m and the room height is just under 3 m (Fig. 2 at the right). The acquired PD signals are processed and a k-nearest neighbours ML algorithm (Nessa et al. 2020) is trained for the variations in the reflections when the test persons are positioned at one of the indicated fields on the floor (Fig. 2 at the right, A1 to A8). For evaluation, the position detection was also tested with persons, which were not participating in the initial training of the system.

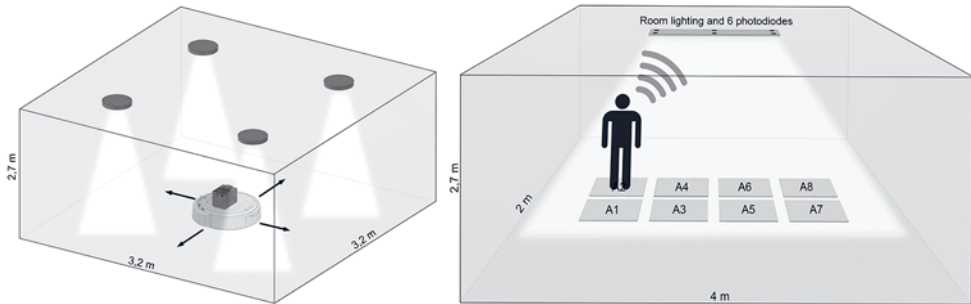


Fig. 2: Test scenario for position determination based on spatially varying light intensity using a detector mounted on a moving object (left image). Test scenario for localization based on light reflections detected via photodiodes (PDs) integrated in a room lighting luminaire (right image).

In a second scenario, the interior lighting is left as it is and the position detection system with the receiver element is mounted on an object moving on the floor of the room. The schematic in Fig. 2 on the left shows the test room of this scenario with 4 LED light sources installed on the ceiling. Furthermore, a so-called angle-diverse receiver is used in this concept, which consists of a micro-optical free-form element and a standard CMOS image sensor, for more details see Lichtenegger et al. (2022). Thus, light rays incident from different directions and angles from the luminaires are directed to different pixel areas of a CMOS sensor. Based on the CMOS images varying for the different positions in space, the location of the receiver is finally determined. For evaluation, a commercial robot with the receiver attached moves in the area under the lights, and the difference between the robot's known position (ground truth) and the position determined by the receiver is calculated.

## 5 RESULTS AND DISCUSSION

The test series with the developed VLC setup in Fig. 1 were performed over distances of 65 cm between the LED desk-lamp and the PD receiver, but can easily be extended to larger distances. Evaluation of the test results showed that the servo motor could be controlled with a rotational accuracy of 1°, which is also the accuracy limit of the servo itself, in parallel with the lighting functionality without any noticeable degradation in system performance. Furthermore, and most importantly for practical applications, this was also tested under changing ambient lighting conditions and it was found that the demodulation of the frequency modulated transmitted intensity worked without problems even under these conditions. Building on this approach for VLC, location-based services can also be derived directly, for example for marketing or information purposes. Luminaires then not only serve their core function of lighting, but also transmit additional information to a user or customer.

For position detection by the PD receivers integrated in the lights (Fig. 2 right), a detection is considered as correct if the area  $A_n$  calculated from the reflections also corresponds to where the person is actually located. It was found that the performance strongly depends on the detailed characteristics

of the training and test persons, such as the colour of the shirt or the hair. Many cases were correctly evaluated, but misclassifications were also observed for objects with extreme variations, i.e. very high or very low reflections. Future improvements are therefore planned firstly with regard to optimizing the field of view for the individual PD receivers and secondly with regard to the evaluation algorithm by implementing additional plausibility checks. Conceivable location-based services derived from such a scenario include for example security functions that can detect whether people are located in restricted areas.

The evaluation of initial results for position determination in the scenario with unchanged room lighting was performed by moving the commercially available robot with the attached receiver by random movements on the floor. The comparison between actual and calculated position can be performed continuously, as image acquisition and position calculation are performed quickly on a Raspberry Pi. Initial tests already showed an accuracy with an average error of 10 cm for position determination within the entire area under investigation. However, this position accuracy, which is satisfactory for many applications, relies heavily on the sophisticated receiver system, which may not be applicable in all situations. For example, a location-based service envisaged for this scenario refers to indoor geofencing.

Recent surveys of indoor positioning systems can be found, for example, in Kunhoth et al. (2020) and Simões et al. (2020), which compare different technologies and methods in terms of accuracy, cost, and power consumption. A few general remarks concern, on the one hand, the fingerprinting method, which is frequently used and whose accuracy strongly depends on the accuracy of the underlying offline map. In any case, the effort required to create such offline maps must be considered as high (Gentner et al. 2020). On the other hand, concerning RF technologies, it should be noted that, first, accuracy is highly dependent on available access points and, second, Round Trip Time (RTT) has significantly increased accuracy compared to Received Signal Strength (RSS). Finally, indoor tracking camera systems involve higher hardware costs and computational overhead, and last but not least, they are associated with severe privacy concerns, at least when human users are involved.

The achievable position accuracy for the different technologies and methods can hardly be compared without going into further details such as the number of systems used or the room dimensions tested. However, in order to give at least rough indications and a brief overview, some results are summarized and compared in the following. The accuracy of Wi-Fi and Bluetooth is usually considered low and in the range of meters. Typically, RSS is used with fingerprinting, but accuracy can be improved with time-of-flight (RTT) while also maintaining user privacy (Gentner et al. 2020). Similarly, for Bluetooth, sub-meter accuracy is only achieved with time-of-flight methods (Cobb 2022). RFID is characterized by short range signals and can therefore provide medium accuracy, but only for small distances. High accuracy is usually achieved with cameras, VLP, or hybrid systems. A position accuracy of 10 cm was demonstrated by Shahjalal et al. (2018) using four fixed cameras. Guo et al. (2017) demonstrated similar accuracy using intensity modulated sinusoidal LED signals with ML. The combination of two cameras with an IMU sensor as an example of a hybrid system provided an accuracy of 50 cm (Cheng et al. 2017).

## **6 CONCLUSIONS AND OUTLOOK**

A test setup reflecting a typical indoor application scenario was used to demonstrate the potential of data communication using VLC. The test results show that the control of a servo motor in parallel with the lighting functionality can be realized even under changing ambient light conditions. Further, two contrary approaches were investigated for indoor localization, one that leaves the lighting infrastructure unchanged and requires a receiver attached to the object, and a second that integrates the receivers into the room lighting and requires no additional components to be attached to the object. Positioning accuracies were determined from initial testing and options for future improvements were derived. In general, visible light technologies offer opportunities for easy and cost-effective deployment in existing buildings to fully exploit the potential of indoor sensor networks together with standard technologies.

Thus, building automation can be leveraged by on-demand control of room thermostats, cooling systems, ventilation, lighting or shading systems in smart buildings, and location-based services can be realized to provide advanced functionalities for modern buildings.

Acknowledgements: This work is supported by the Austrian Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology (BMK) within the project 3DLiDap.

## LITERATURE

- Bellavista-Parent V., Torres-Sospedra J. & Pérez-Navarro A. (2022) Comprehensive analysis of applied machine learning in indoor positioning based on Wi-Fi: An extended systematic review. *Sensors* 22, p. 4622.
- Chen Y., Weipeng G., Li J. & Song H. (2019) Indoor real-time 3-D visible light positioning system using fingerprinting and extreme learning machine. *IEEE Access* 8, pp. 13875-13886.
- Cheng L., Song B., Dai Y., Wu H. & Chen Y. (2017) Mobile robot indoor dual Kalman filter localization based on the inertial measurement and stereo vision. In: *CAAI Trans. Intel. Technol.* 2, pp. 173–181.
- Cobb J. (2022) Indoor Positioning Technology Review 2022. *CrowdConnected 2022* <https://www.crowdconnected.com/blog/indoor-positioning-technology-review-2022/>, zuletzt aufgerufen am 30.3.2023.
- Feezell D. & Nakamura S. (2018) Invention, development, and status of the blue light-emitting diode, the enabler of solid-state lighting. *Comptes Rendus Physique* 19, 3, pp. 113-133.
- Fragner C., Weiss A.P., Wenzl F.P. & Leitgeb E. (2022) Integrated Sensing and Communication in the Visible Spectral Range: A Novel Closed Loop Controller. In: *Int. Conf. on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*, Graz, Austria, pp. 1-7.
- Gentner C., Ulmschneider M., Kuehner I. & Dammann A. (2020) WiFi-RTT Indoor Positioning. In: *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Portland, OR, USA, pp. 1029-1035.
- Guo X., Shao S., Ansari N. & Khreishah A. (2017) Indoor Localization Using Visible Light Via Fusion of Multiple Classifiers. In: *IEEE Photonics Journal* 9, 6, pp. 1-16.
- Kunhoth J., Karkar A., Al-Maadeed S. & Abdulla A. (2020) Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 10, 18.
- Lichtenegger F., Leiner C., Sommer C., Weiss A., Kröpf A. & Zahiri-Rad S. (2022) Compact angle diversity receiver concept for visible light positioning. In: *Proceedings for Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VII* 12138.
- Lu C., Uchiyama H., Thomas D., Shimada A. & Taniguchi R. (2019) Indoor positioning system based on chest-mounted IMU. *Sensors* 19, p. 420.
- Nassar N. & Abdulaziz N. (2019) Integrated broadband powerline and visible light communication (VLC) using OFDM and turbo coding. *International Journal of Computing and Information Sciences* 12, pp. 33-41.
- Nessa A., Adhikari B., Hussain F. & Fernando X.N. (2020) A survey of machine learning for indoor positioning. *IEEE Access* 8, pp. 214945-214965.
- Rehman U., Ullah S., Chong P.H.J., Yongchareon S. & Komosny D. (2019) Visible Light Communication: A System Perspective Overview and Challenges. *Sensors* 19, 5, pp. 1-22.
- Shahjalal M., Hossan T., Hasan K., Chowdhury M., Le N. & Jang Y. (2018) An Implementation Approach and Performance Analysis of Image Sensor Based Multilateral Indoor Localization and Navigation System. In: *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, pp. 1–13.
- Simões W., Machado G., Sales A., Lucena M., Jazdi N. & Lucena Jr V. (2020) A review of technologies and techniques for indoor navigation systems for the visually impaired. *Sensors* 20, p. 3935.
- Wang Q. & Zuniga M. (2017) Passive Sensing and Communication Using Visible Light: Taxonomy, Challenges and Opportunities. In: [arxiv.org/pdf/1704.01331.pdf](https://arxiv.org/pdf/1704.01331.pdf).

# Session 3c

## Ökologische, wirtschaftliche und soziale Aspekte

**Wie „fit“ sind „klimafitte“ Maßnahmen? –  
Methodenvorschlag zur interdisziplinären Bewertung von  
Wiener Parkanlagen**

Michel, Helnwein / FH Technikum / AT

**Risikobewertung von Immobilienbeständen bei ESG Audits**

Stocker, Koch / FH Kufstein / AT



# Wie „fit“ sind „klimafitte“ Maßnahmen? – Methodenvorschlag zur interdisziplinären Bewertung von Wiener Parkanlagen

M. Michel, J. Helnwein  
*FH Technikum, Wien, Österreich*

**ABSTRACT:** Densely populated urban areas are simultaneously the regions most affected by the climate crisis and key innovation centers for climate adaptation and mitigation solutions. Given future climate projections, public urban parks will play a key role in alleviating climate-related consequences, while maintaining economic, environmental, and social stability and well-being. The focus of the Urban Climate Reactor (UCR) Competence Team of the City of Vienna lies on inter- and transdisciplinary assessment of climate adaptation and mitigation strategies. In that context, the guiding objective of this paper is to build a knowledge and methodology catalogue for evaluating the socio-ecological compatibility of Viennese parks. This research is based on explorative literature research and an in-house survey that allowed for the integration of interdisciplinary expertise. This paper serves as a first insight into the topic of integrative “climate fitness” of public parks through the development of a preliminary definition and methodology proposition.

## 1 EINLEITUNG & HINTERGRUND

Die zunehmende Häufigkeit von Extremwetterereignissen und deren Folgen haben massive Auswirkungen auf die städtische Lebensqualität. Die Synthese des 6. IPCC-Sachstandsberichts zeichnet ein herausforderndes Bild der weltweiten Klimawandelfolgen: Stürme, Anstieg des Meeresspiegels, Überschwemmungen und Waldbrände, Hitzewellen, die zu einer verminderten Ernährungs- und Trinkwassersicherheit beitragen, eine Zunahme der Hitzetoten und das vermehrte Auftreten von Infektionskrankheiten sowie einem starken Anstieg psychischer Erkrankungen (Mukherji et al. 2023). Auch für den urbanen Raum ist es wichtig anzumerken, dass Klimaveränderungen nicht alle Menschen gleichermaßen betreffen (Lalonde 2021). So werden einkommensschwache Gemeinden, sowie Stadtteile mit hoher Bodenversiegelung am stärksten unter urbanen Klimarisiken leiden (Regas et al. 2022). Daher ist es von erheblicher Bedeutung, dass Städte ihre Anstrengungen in der kommunalen Umweltpolitik rasch verstärken, um die urbanen Ökosysteme und ihre Menschen, Tiere und Pflanzen vor diesen Risiken zu schützen.

Angesichts zukünftiger Klima- und Stadtbevölkerungsprognosen (Mukherji et al. 2023; United Nations 2019) zeigt sich, dass öffentliche Grünflächen eine wachsende Rolle bei der Eindämmung des Klimawandels und der Erhaltung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Stabilität in urbanen Räumen spielen werden. Öffentliche Grünflächen können somit als „low-tech, high benefit“ Strategie für Klimaadaptation und -mitigation dienen (Regas et al. 2022, p. 5). Wichtig zu beachten ist, dass Parks nicht nur Teil der Lösung, sondern selbst anfällig für Klimabedrohungen sind. In diesem Kontext ist die Bewertung der „Klimafitness“ und der Klimawirksamkeit von Stadtgrün von zentraler Bedeutung.

Öffentliche Parkanlagen dienen als wichtige Schmelztiegel für sozial-ökologische Transformation. Parklandschaften prägen nicht nur das Stadtbild, sondern bestimmen stadtklimatische Verhältnisse, urbane Lebensqualität, soziale Kohäsion und ökologische Werthaltung und Verantwortungsbewusstsein eines Bezirks- oder Quartiersebene (Berger & Ehrendorfer 2011). Trotz ihres starken anthropogenen Einflusses sind Parks essentielle urbane Ökosysteme, die eine Vielzahl an Ökosystemdienstleistungen erbringen (Bolund & Hunhammar 1999). Dazu zählen die Eindämmung von urbanen Hitzeinseln (Mullaney et al. 2015), die Speicherung von Regenwasser (Xiao & McPherson 2002) und die Verbesserung der Luftqualität (Beckett et

al. 1998). Daraus resultieren positive Auswirkungen auf die physische und psychische Gesundheit der Bevölkerung (z.B. Ohta et al. 2007; van den Berg et al. 2010). Somit bieten Ökosystemdienstleistungen, sowie ihre Nachteile (s. Shah et al. 2022, p. 7), die Grundlage zur Bewertung klimafitter Maßnahmen.

Demensprechend ist es relevant, die „Klimafitness“ von Parkanlagen zu bewerten, um die Optimierung von öffentlichen Freiräumen als urbane „grüne Lungen“ (Rosenberger et al. 2014, p. 114) zu ermöglichen. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es bislang jedoch keine standardisierte Definition oder einheitliches Bewertungsschema zur Beurteilung der „Klimafitness“ von urban Grünflächen.

Im Rahmen des „Urban Climate Reactor (UCR)“ Projektes der Stadt Wien wird folgenden Forschungsfragen nachgegangen: „Inwiefern tragen städtische Parks zur sozialen Integration und Erhaltung der Biodiversität sowie zur Klimaadaptation und -mitigation bei, und wie können sie in Bezug auf die gesellschaftlichen Bedürfnisse und ökologischen Anforderungen optimiert werden?“

Das vorliegende Paper soll einen ersten Einblick in das Thema der integrativen „Klimafitness“ von Wiener Parkanlagen geben und dient zur Vorarbeit für die Erstellung von einem ersten dynamischen „Klimafitness“-Konzept. Den Ausgangspunkt bildet die Erweiterung des Fachbegriffs „Klimafitness“ durch das Einbeziehen ökologischer, politischer, ökonomischer und soziokultureller Aspekte - ein bedeutender Schritt in Richtung eines umfassenden Verständnisses der Komplexität innerhalb der Subsysteme „Umwelt, Mensch, Technik, Ökonomie“. Das Ziel dieses Beitrages ist die Präsentation eines vorläufigen „Klimafitness“-Methodenvorschlags mit entsprechenden Kriterien und Indikatoren. Die praktische Anwendung wurde bewusst ausgelassen, da die interdisziplinäre Weiterentwicklung und qualitative Anwendung des Bewertungsansatzes Gegenstand zukünftiger Fallstudien sein wird.

## 2 METHODIK

Im Rahmen dieses Beitrages wurde ein interdisziplinärer und qualitativer Ansatz genutzt, um einen Leitfaden zur Analyse der „Klimafitness“ von urbanen Parkflächen zu entwickeln. Um eine solide Grundlage für die Analyse „der Klimafitness“ von urbanen Parkanlagen zu generieren, wurde eine explorative Literaturrecherche durchgeführt. Durch eine detaillierte Analyse nationaler und internationaler Studien konnte eine umfassende Bestandsaufnahme bestehender „Klimafitness“-Definitionen und Konzepte erstellt werden.

Darauf aufbauend wurde eine interne Umfrage durchgeführt, bei der Definitionen des Begriffs „Klimafitness“ sowie mögliche Kriterien und Indikatoren zur Bewertung erfasst wurden. Das Sampling erfolgte auf Basis bestehender Literatur und Konzepte zum Thema „Klimafitness“ und konzentriert sich entsprechend auf die Kompetenzen des F&E-Schwerpunkt „Renewable Energy Systems“ an der FH Technikum Wien. Neben der Einbeziehung der im Projektteam verfügbaren Expertise flossen die Kenntnisse aus der Literaturrecherche (z.B. Ferreira et al. 2022) in die Kriterienentwicklung hinein.

Die aus der Literatur erarbeiteten Ziele, Kriterien und Indikatoren wurden zur vereinfachten Darstellung dieses „Klimafitness“- Bewertungsansatzes in Form eines hierarchischen „Klimafitness“-Zielbaum (Abb. 1) zusammengebracht. Um ein tiefes Verständnis des vorläufigen Methodenvorschlags zu vermitteln, wurden Wechselbeziehungen und Zielkonflikte, die sich in Wiener Parks zeigen, veranschaulicht.

## 3 ERGEBNISSE

Die entwickelte Definition und der präsentierte Bewertungsansatz stellen einen vorläufigen und dynamischen Ansatz dar, welcher basierend auf neuen Erkenntnissen laufend angepasst werden kann. Durch die ständige Weiterentwicklung kann der Ansatz den aktuellen Stand der Forschung widerspiegeln.

### 3.1 AKTUELLE „KLIMAFITNESS“-KONZEPTE

Das Ergebnis der Recherche zeigt, dass aktuell noch keine einheitliche Definition der „Klimafitness“ existiert. Der Begriff findet in den unterschiedlichsten Bereichen der Bauwirtschaft, Gebäudetechnik, Betriebswirtschaft und Industrie Anwendung. Erste Definitionsansätze sind in der Klimaforschung und

Raumplanung zu finden (Seidl 2012). Das österreichische Landwirtschaftsministerium bezeichnet „klimafitte“ Waldflächen beispielsweise als „jene, deren Zusammensetzung und Struktur an das Klima angepasst sind“ (Rechnungshof Österreich 2022, p. 9). Ein weiteres Beispiel ist das „Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space (CLISP)“ Projekt, es nutzt die Notion von „Klimawandel-Fitness“ (Pütz et al. 2011) zur Bewertung von räumlicher Entwicklung in Alpenregionen. Auch im „Klimawandel-Anpassungsmodellregionen (KLAR!)“ Programm kommt der Fachbegriff vereinzelt vor (Klima- und Energiefonds 2023). Diese Konzepte berücksichtigen hauptsächlich den Erhalt der natürlichen Potentiale dieser Systeme, die Fähigkeit zur Reduktion von Klimawandelwirkungen und das Erschaffen von positiven Auswirkungen auf die Ökosysteme und ihre natürlichen Ressourcen.

**3.2 DIE UCR „KLIMAFITNESS“ DEFINITION**

Die Ergebnisse der Recherche zeigen, dass die Wahrnehmung von „Klimafitness“ relativ eindimensional ist und die komplexen Wechselwirkungen innerhalb des „Umwelt, Mensch, Technik, Ökonomie“-Systems vernachlässigt. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, den Faktor „Mensch“ in das „Klimafitness“-Konzept einzubeziehen. Die Definition soll über den klassischen zweidimensionalen Systemansatz (soziotechnisch, sozioökologisch, ökoökonomisch...) hinausgehen. Dies ermöglicht es ein skalierbares Verständnis von „Fitness“ zu entwickeln.

Die UCR „Klimafitness“ Definition beschreibt die Fähigkeit eines Systems oder einer Gemeinschaft, sich an die sich ändernde klimatischen Bedingungen anzupassen und dabei flexibel sowie wandlungsfähig zu bleiben. Belastbarkeit (coping capacity), Adaptierbarkeit (adaptability) und Wandelbarkeit (transformability) sind dabei drei zentrale Merkmale, die die Fähigkeit eines Systems zur Bewältigung von klimatischen Herausforderungen beeinflussen. Eine erfolgreiche „Klimafitness“-Strategie sollte sicherstellen, dass alle Systemebenen - unter Berücksichtigung der jeweiligen Wechselbeziehungen - in die Planung und Umsetzung von Maßnahmen einbezogen werden. „Klimafitte“ Maßnahmen sollen gleichzeitig einen Mehrwert für Umwelt, Wirtschaft, Gesellschaft und den Menschen erschaffen.

**3.3 DER UCR „KLIMAFITNESS“-BEWERTUNGSANSATZ**

Die Entwicklung eines aussagekräftigen und umfassenden Ziels auf Basis identifizierter klimawandelbezogener Probleme ist essentiell, um Risiken, Wechselwirkungen, Lücken und Chancen in der Grünraumentwicklung zu erkennen. Dieses Ziel bildet eine stabile Grundlage für die Identifizierung von präzisen Kriterien und Indikatoren, welche eine umfassende Evaluierung der tatsächlichen Wirkung von Klimaanpassungs- und Schutzmaßnahmen ermöglichen (Abb. 1).

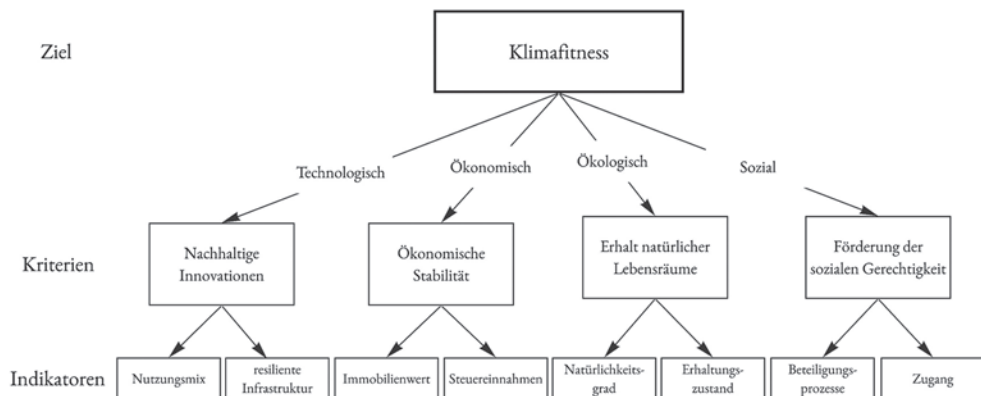


Abb. 1: Zielbaum des Bewertungsansatzes mit einem Auszug aus möglichen Kriterien und Indikatoren

Die Verknüpfung der „Klimafitness“-Definition mit urbanen Parkanlagen basiert auf dem übergeordneten Ziel, dass städtische Parks zur sozialen Integration, Erhaltung der Biodiversität und zur Klimaadaptation und -mitigation beitragen und sowohl den Bedürfnissen der Anwohner\*innen als auch ökologischen Anforderungen gerecht werden.

### 3.4 „KLIMAFITNESS“-KRITERIEN UND INDIKATOREN

Aufgrund der Vielzahl an Kriterien und Indikatoren wurde eine Auswahl getroffen, um einen klaren und aussagekräftigen Überblick zu erhalten. Basierend auf Erkenntnissen unter anderem von Ferreira et al. (2022) konnten folgende Kriterien und Indikatoren als repräsentativ für die ökologische, soziale, wirtschaftliche und technologischen „Klimafitness“ gesehen werden:

**Ökologische „Klimafitness“-Kriterien:** Parkanlagen sollen die Funktion von (kleinen oder großflächigeren) „grünen Lungen“ und „natürlichen Klimaanlagen“ innerhalb der Stadt erfüllen und dienen als essentieller Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Die symbiotischen Wechselbeziehungen zwischen Fauna und Flora leisten somit einen lebenswichtigen Beitrag zur urbanen Umwelt- und Lebensqualität (z.B., Feinstaubfilter, Regenwassermanagement, Frischluftschneisen, Beschattung, Lärminderung, etc.). Urbane Grünräume bieten ebenfalls großes Potential für Klimaadaptation und -mitigation durch die direkten und indirekten Leistungen von Ökosystemen. Der Schutz und die Förderung der Biodiversität und Ökosystemleistungen werden in Zukunft erheblich an Bedeutung gewinnen, denn „sie müssen so gestaltet werden, dass sie den Auswirkungen des Klimawandels standhalten und die Stadt bei der Anpassung an den Klimawandel unterstützen“ (Rosenberger et al. 2014, p. 115).

**Ökologische Indikatoren:** Verteilung von Grünflächen und Freiflächenverbindungen; Versiegelungsanteil; Natürlichkeitsgrad; Grünraumanteil; Albedo; Leaf Area Index, Kühlungseffekt und Luftqualität im Park und der nahen Umgebung; Feinstaubbindung; CO<sub>2</sub>-Bindung; Lärmreduktion; Evapotranspiration; Wasserqualität; Grundwasserbereitstellung; Regenwasserabfluss-Reduktion; Habitatqualität und -diversität; Anzahl an heimischen und gesetzlich geschützten Arten; Anzahl an Neobiota; Altersstruktur der Gehölze; Erhaltungszustand; Gesamtwasserbedarf.

**Soziale „Klimafitness“:** Urbane Parks sind wichtige Orte für Erholung, Rückzug, Freizeitgestaltung, Begegnung und Interaktion. Dementsprechend repräsentieren diese öffentlichen Räume entscheidende Knotenpunkte für die Optimierung der „Klimafitness“. Universelle und gleichberechtigte Teilhabe ist eine zentrale Voraussetzung für eine inklusive, demokratische und nachhaltige Gesellschaft. Im Kontext von Parks geht es insbesondere um Barrierefreiheit, Altersgerechtigkeit, Geschlechtergerechtigkeit sowie sozioökonomische und ethnische Gerechtigkeit. Hier spielt das Gewährleisten von einem „hohen subjektiven Sicherheitsgefühl im öffentlichen Raum“ (Rosenberger et al. 2014, p. 120) ebenfalls eine zentrale Rolle.

Der aktive Einbau von Barrieren in öffentlichen Parks ist nicht nur unsozial und trägt aktiv zur Ausgrenzung bei, sondern widerspricht auch dem „Klimafitness“-Gedanken und verringert die allgemeinen Aufenthaltsqualität. Inklusive Planung und universelles Design, macht nicht nur finanziell Sinn, sondern sichert die Langlebigkeit und Anpassungsfähigkeit der Parkinfrastruktur und ermöglicht die Schaffung von qualitätsvollen, alltagsgerechten und fußläufigen Grünräumen. Parks sind ebenfalls wichtige Orte des kulturellen Austauschs und spielen damit eine wichtige Rolle für den gemeinschaftlichen Zusammenhalt, sowie die ökologische und soziokulturelle Bewusstseinsbildung. Der Wert dieser öffentlichen Räume liegt im Sozialkapital, das sie bereitstellen.

**Soziale Indikatoren:** Demographie der Parkbesucher; Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu qualitätsvollen Grünräumen in 250 Metern; Parknutzungstypologie; Ausstattung (wie Spielplätze, Hundezonen, Sitzgelegenheiten); Zugänglichkeit (wie rutschfeste Gehwege); Subjektives Sicherheitsgefühl (wie Beleuchtung, freie Sicht); Anzahl an (von der Stadtverwaltung) organisierten Parkaktivitäten; Anzahl an Denkmäler und Informationstafeln; soziales und gesundheitliches Wohlbefinden; Beteiligungsinitiativen (Anzahl, Transparenz, Erreichbarkeit, Teilnehmerzahl); Anzahl (erfolgreicher) Bürger\*innenbeteiligungsprozesse.

**Wirtschaftliche „Klimafitness“:** Grüne Freiräume prägen nicht nur die Identität einzelner Stadtteile, sondern auch das Image der gesamten Stadt. Es gibt zahlreiche Belege dafür, dass die Erhaltung und

Erweiterung öffentlicher Freiräume und die Schaffung neuer Stadtparks effiziente und zukunftsorientierte Investitionen sind, die einen erheblichen wirtschaftlichen Nutzen mit sich bringen (z.B. Ellis & Schwartz 2016; The Park Alliance 2020). Die Nähe zu Parks erhöht den lokalen Immobilienwert und die damit verbundenen Steuereinnahmen, führt zu einer Steigerung der (regionalen) Konjunktur und spielt eine wichtige Rolle für die urbane Tourismuswirtschaft (Harnik et al. 2006). Parks sind ebenfalls eine passive Quelle wirtschaftlicher Wertschöpfung. Durch den Erhalt und Ausbau dieser Grünflächen können Kosten für Gesundheitsvorsorge, Klimaanpassung und -mitigation sowie Nutzungskonflikte vermieden werden, die in Zukunft durch politisches Nichthandeln entstehen könnten.

*Wirtschaftliche Indikatoren:* Infrastruktur- und Instandhaltungskosten; Kosten von politischem Nichthandeln; Anzahl an und Intensität der (klimawandelbedingte) Infrastrukturschäden; Mietpreise und Immobilienwert; Steuereinnahmen; Anteil an kostenfreien und kostenpflichtigen Erholungsmöglichkeiten pro Einwohner\*in; Anzahl an Touristen und Einheimischen in Parks; Einnahmen durch Touristen und lokale Bevölkerung in und um Parkflächen; monetärer sozialer Wert.

*Technologische „Klimafitness“:* Städtisches Grün muss wandelbar sein. Hier geht es um mögliche Funktionsänderungen und (technische) Ergänzungen, die sich in Zukunft ergeben können. Öffentlichen Freiräume sollten daher ein Potential für flexible Bedarfsanpassungen und andere Adaptierungsmöglichkeiten gewährleisten. Wie die Wiener Magistratsabteilung für Stadtentwicklung und Stadtplanung erklärt: „Im gründerzeitlichen Wien steht die Adaptierung des öffentlichen Raums für einen vielfältigen Nutzungsmix“ (Rosenberger et al. 2014, p. 114).

*Technologische Indikatoren:* Anzahl an umgesetzten (technologischen) Klimaanpassungsmaßnahmen und Innovationen zur Erhöhung der Resilienz und des Nutzungsmix; Energieverbrauch von und Anteil an erneuerbaren Energiequellen für Parkinfrastruktur und Instandhaltung; Lichtverschmutzung; Umweltfreundlichkeitsgrad (Klimaneutralität) der Materialien zur Parkgestaltung

### 3.5 BEISPIELE ZU MÖGLICHEN WECHSELBEZIEHUNGEN

Aus den vorläufig entwickelten Kriterien zeichnen sich erste Wechselbeziehungen und Zielkonflikte ab, die in diesem Unterkapitel in Beispielen kurz erläutert werden.

- Klassische Ballspielkäfige lassen sich in vielen Wiener Parkanlagen finden, wobei der Bodenbelag meist aus Asphalt oder Kunststoff besteht. Eine Alternative zu diesen versiegelten Flächen wären Rasenflächen. Die Begrünung der Fläche würde nicht nur zu niedrigeren Oberflächentemperatur führen, sondern auch zu einer Speicherung von Regenwasser und zur Reduktion des Wasserabflusses in das Kanalsystem (Gill et al. 2007). Die Ausweitung von Rasenflächen verbessert zwar die Ökosystemdienstleistung der Parks, zeitgleich wird durch die Begrünungsmaßnahme aber die Barrierefreiheit zu diesen Spielplätzen eingeschränkt. Körperlich beeinträchtigen Personen steht somit die Fläche nicht gleichwertig zu Verfügung, auch bei Regen ist dieser Platz nur begrenzt nutzbar.
- Parks werden oft mit Denkmälern, Statuen oder architektonischen Elementen von kultureller Bedeutung geschmückt. Die Aufbewahrung historischer und politischer „Narben“ ist nicht nur essentiell zur Sicherung des kulturellen Erbes, sondern hat auch auf ökologischer Ebene Bedeutung (Butt 2018; Lička et al. 2018). Allerdings wird oft der historische Kontext nicht ausreichend berücksichtigt, was die Rolle von Parks als sozio-kulturelles Archiv einschränkt. Ein exemplarisches Beispiel sind die Flaktürme im Augarten (2. Bezirk). Die fehlenden Erklärungs- und Gedenktafeln zur Bedeutung der Flaktürme sowie den Geschehnissen des Zweiten Weltkriegs schränken den gesellschaftlichen Dialog ein. Zusätzlich zu ihrer kulturellen Bedeutung bieten die Flaktürme Potentiale für die Nutzung als Energie- und Wärmespeicher (Leitner 2012). Solche Maßnahmen würden nicht nur die soziokulturelle Bewusstseinsbildung und vielseitige Nutzung von Parkflächen fördern, sondern ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten.
- Stadtentwicklung, die auf Nachhaltigkeit und Grünflächen ausgerichtet ist, kann zu Öko-Gentrifizierung („green gentrification“) führen – ein Erneuerungs- und Verdrängungsprozess, der tief verwurzelt ist im US-amerikanischen historischen Kontext der Segregation und dem daraus ent-

stehenden umweltbedingten Rassismus („environmental racism“) (Kang 2021). Die Umsetzung einer Umweltplanungsagenda sowie die Schaffung von Parkanlagen und anderen grünen Annehmlichkeiten führt zur erheblichen Steigerung der Attraktivität eines Stadtteiles, was das Interesse von Bauträgern und Immobilienmakler erweckt. Wohnungen werden nicht nur aufgrund ihres Zugangs zu Freizeiteinrichtungen und Begrünung vermarktet, sondern ebenfalls wegen der Zunahme anderer Bau- und Verschönerungsprojekte (Sission 2022). Die daraus resultierende Steigerung der Wohnungspreise führt jedoch zu Verdrängung einkommensschwacher Gruppen und zur Homogenisierung der Bewohnerzusammensetzung. Die dadurch produzierte Exklusivität der Parks kann bei diesen Bevölkerungsschichten zu einem Gefühl des Nicht-Willkommenseins und der resultierenden Ausgrenzung zu essentieller Infrastruktur beitragen (Chen et al. 2021). Dementsprechend müssen grüne Infrastrukturprojekte und Klimamaßnahmen durch das Prisma der verschiedenen Interessengruppen und sozialen Dynamiken betrachtet werden (Lička et al. 2018). Um räumliche Gerechtigkeit effektiv zu fördern, müssen soziopolitische und sozioökonomische Einflüsse, die die Agenda der Parkpolitik bestimmen, entschlüsselt werden.

Die Vernetzung der Kriterien wirft die Frage auf, ob Parkanlagen das Ziel verfolgen sollen, alle Aspekte der „Klimafitness“ zu erfüllen. Die komplexen Wechselbeziehungen zeigen, dass eine Abwägung aller Bereiche notwendig ist und Kompromisse eingegangen werden müssen. Deswegen kann es sinnvoll sein Parks auf bestimmte Ausrichtungen oder Nutzungsformen zu spezialisieren. Zur Entwicklung einer „klimafitten“ Strategie müssen Konflikte zwischen den jeweiligen Kriterien differenziert und in Abhängigkeit des Nutzungstyps des betroffenen Parks betrachtet werden. Nur so können Kompromisse in Form von qualitativen hochwertigen Alternativen gefunden werden. Ziel soll eine gerechte Verteilung der unterschiedlichen Parktypen sein, damit jede\*r sowohl von den positiven Auswirkungen auf das Mikroklima, als auch von dem gesellschaftlichen Mehrwert in seiner unmittelbaren Umgebung profitieren kann.

Bei Nutzungskonflikten, die auf Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Nutzungsansprüchen zurückzuführen sind, können verschiedene Entscheidungsansätze wie Top-Down oder Bottom-Up angebracht sein, oder es kann ein Mittelweg gefunden werden, bei dem das Kriterium mit dem größten Verbesserungspotential priorisiert wird. Allerdings bedarf es weiterer Untersuchung, um effektive Strategien zur Bewältigung von Nutzungs- und Zielkonflikten zu entwickeln.

## 4 AUSBLICK

In weiteren Forschungsarbeiten wird die weitere Ausarbeitung dieses „Klimafitness“-Methodenansatzes erfolgen. Ziel davon ist die Ausarbeitung einer anwendbaren „Klimafitness“-Matrix.

Um bestehende Wissenslücken zu füllen, ist der Austausch mit Expert\*innen und Stakeholdern mit interdisziplinärem Fachwissen notwendig. Darüber hinaus soll dieser Bewertungsansatz auch quantitativ abgeschätzt werden, um eine umfassende Bewertung der „Klimafitness“ von Wiener Parkanlagen zu ermöglichen. Anhand von Mikroklimasimulationen via ENVI-met Software (Bruse 1994) soll der Wert von urbanen Grünanlagen veranschaulicht werden. Gleichzeitig werden explorative Umfragen, landschaftsplanerische Spaziergänge und Expert\*inneninterviews genutzt, um Einsichten in den Faktor „Mensch“ (d.h. Nutzungsgewohnheiten und Bedürfnisse) zu gewinnen und ein Klassifizierungssystem für Wiener Parks zu entwickeln. Durch eine eingehende Analyse der unterschiedlichen Parktypen (i.e., Mikrofreiräume, Bezirksparks, Zentralparks, Waldparks, etc.) könnte zu einem genaueren Verständnis der „Klimafitness“-Notion führen, bzw. welche Indikatoren für die diversen Parkarten angemessen sind und in welchem Maße sie die ausgewählten Kriterien erfüllen können. Darüber hinaus könnte somit ein Einblick in ihr Optimierungspotential gewonnen werden. Die Kombination von qualitativen und quantitativen Methoden wird eine wichtige Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten im Bereich „Klimafitness“ schaffen.

Ein weiteres Forschungsinteresse besteht darin, die zukünftige Veränderung von Freiflächen und

deren Schlüsselrolle durch einen erhöhten Nutzungsmix, wie z. B. die Kombination von Erholung und Energiegeneration und -speicherung, zu untersuchen. Ziel davon ist die Generierung von neuen Ideen, Meinungen und Einsichten zu diesem Nischenforschungsgebiet.

## LITERATUR

- Beckett K. P., Freer-Smith P. H., & Taylor G. (1998) Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99(3), 347–360. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00016-5)
- Berger R., & Ehrendorfer F. (Hrsg.) (2011) *Ökosystem Wien: die Naturgeschichte einer Stadt*. Böhlau Verlag.
- Bolund P., & Hunhammar S. (1999) Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)
- Bruse M. (1994) ENVI-met (5.1) [Software]. ENVI-met GmbH.
- Butt V. (2018) Revealing the Heritage of Post-Military Landscapes. *SPOOL*, 5(2), 7–18. <https://doi.org/10.7480/spool.2018.2.3306>
- Chen Y., Xu Z., Byrne J., Xu T., Wang S., & Wu J. (2021) Can smaller parks limit green gentrification? Insights from Hangzhou, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 127009. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127009>
- Ellis D. & Schwartz R. (2016) The Roles of an Urban Parks System. *World Urban Parks*. <https://www.worldurbanparks.org/images/Documents/The-Roles-of-an-Urban-Parks-System.pdf>
- Ferreira F., Vasconcelos L. & Ferreira J. C. (2022) Socio-ecological and economic evaluation of urban parks - A methodology integrating and articulating diverse components. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 40, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2022.100512>
- Gill S. E., Handley J. F., Ennos A. R. & Pauleit S. (2007) Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Harnik P., Welle B. & Keenan L. S. (2006) Measuring the Economic Value of a City Park System. Trust for Public Land. <https://www.tpl.org/resource/measuring-economic-value-city-park-system>
- Kang H. (2021) Looking Toward Restorative Justice for Redlined Communities Displaced by Eco-Gentrification. *Michigan Journal of Race & Law*, 26.0, 23. <https://doi.org/10.36643/mjrl.26.sp.restorative>
- Klima- und Energiefonds. (2023) KLAR! Programm. KLAR!-Serviceplattform Umweltbundesamt. <https://klar-anpassungsregionen.at/klar-programm>
- Lalonde M. (2021) Opinion: Climate change is here, but it's not the great equalizer we thought it might be. *Pique Newsmagazine*. <https://www.piquenewsmagazine.com/piquen-yer-interest/opinion-climate-change-is-here-but-its-not-the-great-equalizer-we-thought-it-might-be-3937531>
- Leitner S. (2012) *Flaktürme als saisonale Wärmespeicher*. GRIN Verlag.
- Lička L., Tusch R. & Krippner U. (2018) Park Politics. *SPOOL*, 5(2), 3–6. <https://doi.org/10.7480/spool.2018.2.3307>
- Mukherji A., Thorne P., Cheung W. W. L., Connors S. L., Garschagen M., Geden O., Hayward B., Simpson N. P., Totin E., Blok K., Eriksen S., Fischer E., Garner G., Guivarch C., Haasnoot M., Hermans T., Ley D., Lewis J., Nicholls Z., ... Yassaa N. (2023) Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Summary for Policymakers.
- Mullaney J., Lucke T. & Trueman S. J. (2015) A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013>
- Ohta M., Mizoue T., Mishima N. & Ikeda M. (2007) Effect of the Physical Activities in Leisure Time and Commuting to Work on Mental Health. *Journal of Occupational Health*, 49(1), 46–52. <https://doi.org/10.1539/joh.49.46>
- Pütz M., Kruse S. & Butterling M. (2011) Assessing the Climate Change Fitness of Spatial Planning. A

- Guidance for Planners. [https://www.researchgate.net/publication/232314984\\_Assessing\\_the\\_Climate\\_Change\\_Fitness\\_of\\_Spatial\\_Planning\\_A\\_Guidance\\_for\\_Planners](https://www.researchgate.net/publication/232314984_Assessing_the_Climate_Change_Fitness_of_Spatial_Planning_A_Guidance_for_Planners)
- Rechnungshof Österreich. (2022) Wald im Klimawandel: Strategien und Maßnahmen (p. 111). [https://www.rechnungshof.gv.at/rh/home/home/Wald\\_im\\_Klimawandel\\_2022\\_37.pdf](https://www.rechnungshof.gv.at/rh/home/home/Wald_im_Klimawandel_2022_37.pdf)
- Regas D., Shane B., Schottland T., Hwang L., Klein W., Chapman R., Strickland C., Mark R., Rodriguez G., Franklin O., Foderaro L., Maley K., Kohut H., Williams D., McCullough A., Shandas V., Liss K., Nichol S., Flin J., ... Hill T. (2022) The Power of Parks to Address Climate Change - A special Report. Trust for Public Land. <https://www.tpl.org/parks-address-climate-change-report>
- Rosenberger M., Conrad K., Falter M., Hetzmanseder B., Hutter J., Liebhart M., Mittringer K., Müllner K., Rauscher B. & Söpper K. (2014) STEP 2025 STADTENTWICKLUNGSPLAN WIEN. Stadtentwicklung Wien Magistratsabteilung 18 – Stadtentwicklung und Stadtplanung. <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/strategien/step/step2025/publikationen.html>
- Seidl R. (2012) Wie "klimafit" sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? [Seminar]. 25. Seminar biologischer Forstschutz, Wien. [https://bfw.ac.at/ort1/Vortraege\\_als\\_pdf/BiolFS\\_2012/Seidl.pdf](https://bfw.ac.at/ort1/Vortraege_als_pdf/BiolFS_2012/Seidl.pdf)
- Shah A. M., Liu G., Huo Z., Yang Q., Zhang W., Meng F., Yao L. & Ulgiati, S. (2022) Assessing environmental services and disservices of urban street trees. an application of the emergy accounting. Resources, Conservation and Recycling, 186, 106563. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106563>
- Sission P. (2022) Can Cities Combat 'Green Gentrification'? Bloomberg. <https://www.bloomberg.com/news/features/2022-11-10/a-challenge-for-cities-going-green-without-the-gentrification>
- The Park Alliance. (2020) Levelling Up Places – why parks are one of the smartest investments for infrastructure spending. The Park Alliance. <https://www.theparksalliance.org/levelling-up-places-why-parks-are-one-of-the-smartest-investments-for-infrastructure-spending/>
- United Nations. (2019). World urbanization prospects: the 2018 revision.
- van den Berg A. E., Maas J., Verheij R. A. & Groenewegen P. P. (2010) Green space as a buffer between stressful life events and health. Social Science & Medicine, 70(8), 1203–1210. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2010.01.002>
- Xiao Q., & McPherson E. G. (2002) Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. Urban Ecosystems, 6(4), 291–302. <https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000004828.05143.67>

Gefördert von



**Stadt  
Wien**

Wirtschaft, Arbeit  
und Statistik

Kontakt:

Mélanie Michel

Urban Climate Reactor (UCR) Kompetenzteam

Fachhochschule Technikum Wien GmbH

Giefinggasse 6

A-1210 Wien, Österreich

Tel. +431 333 40 77 - 4854

[melanie.michel@technikum-wien.at](mailto:melanie.michel@technikum-wien.at)

<https://www.technikum-wien.at/forschungsschwerpunkt-renewable-energy-systems/>

# Risikobewertung von Immobilienbeständen bei ESG Audits

E. Stocker, D. Koch

*FH Kufstein Tirol, Kufstein, Österreich*

**ABSTRACT:** The focus of this paper is on the risk assessment of ESG (Environmental, Social and Governance) criteria for conducting an ESG audit of real estate. Primarily, the EU taxonomy serves to force capital flows into sustainable economic activities. For the real estate industry, this regulatory framework has a corresponding importance, especially as the phases of new construction, renovations, acquisition and operation are affected and also driven by the industry. The criteria defined by the EU taxonomy are not subject to any weighting for the evaluation. Rather, the degree of fulfillment is surveyed in the industry. For the practical applicability of such an ESG audit, however, different classifications should be presented. Finally, these serve as a basis for decision-making for possible optimization approaches.

The objective of this paper is to apply risk management methods for the evaluation of criteria in concrete audits. On the basis of surveys and evaluations carried out, the question arises as to which methodology can be used to evaluate the risks in order to be able to present a corresponding added value for further decisions.

As a basis for the investigation 15 accomplished audits at inventory objects serve. Risk management methods (AHP model) are used to derive weightings and prioritizations of the criteria. The weightings are further used to define various recommendations for action. The present work examines different scenarios of possible weightings and their impact on the respective recommendations.

The results of the study present the challenges in the analysis and evaluation of ESG criteria. The chosen methodology of the AHP model is helpful for the definition of the relevant criteria and it shows that the recommendations for the optimization of the stock can be aligned accordingly. One challenge in conducting the audit was the classification of consumption or demand values (energy certificate) as primary energy with regard to national or regional 15% thresholds. For this purpose, annually adjusted and transparent benchmarks are absolutely necessary in the future.

## 1 EINLEITUNG

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Risikobewertung von ESG-Kriterien (Environmental, Social and Governance) für die Durchführung eines ESG Audits bei Immobilien. Die EU Taxonomie (Verordnung 2020 & Verordnung 2021) dient der Forcierung von Kapitalströmen in nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten. Für die Immobilienwirtschaft hat dieser regulative Rahmen eine entsprechende Bedeutung, zumal die Phasen von der Neuerrichtung, Renovierungen, dem Erwerb und dem Betrieb betroffen sind. Die Taxonomie wird verwendet, um zu bestimmen, welche Aktivitäten als nachhaltig angesehen werden können und somit für Investitionen in den Bereich der nachhaltigen Entwicklung in Frage kommen. Die ESG Kriterien und die Taxonomie sind eng miteinander verknüpft, da die Taxonomie den Rahmen für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Investitionen durch die ESG-Kriterien bereitstellt. Investoren können die ESG-Kriterien verwenden, um zu bewerten, ob ein Unternehmen die Umwelt-, Sozial- und Governance-Standards erfüllt, die von der EU-Taxonomie als nachhaltig eingestuft werden.

### 1.1 AUSGANGSLAGE UND PROBLEMSTELLUNG

Die von der EU Taxonomie definierten Kriterien unterliegen für die Auswertung keiner Gewichtung. Vielmehr wird hierbei in der Branche der Erfüllungsgrad erhoben. Dorfleitner et al. (2015) haben in

derer Untersuchung bereits auf die Mängel an den Messungen und Vergleichbarkeiten von ESG Bewertungsmodellen hingewiesen. Für die praktische Anwendbarkeit eines solchen ESG Audits sollten jedoch verschiedenen Klassifizierungen dargestellt werden. Schließlich dienen diese als Entscheidungsgrundlage für zukünftige Maßnahmen bzw. Optimierungsansätze.

## 1.2 ZIELSETZUNG UND GANG DER UNTERSUCHUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden des Risikomanagements für die Bewertung der Kriterien bei konkreten Audits anzuwenden. Anhand von durchgeführten Erhebungen und Bewertungen ergibt sich die Fragestellung, nach welcher Methodik die Risiken ausgewertet werden können, um einen entsprechenden Mehrwert für weitere Entscheidungen darstellen zu können. Als Grundlage für die Untersuchung dienen 15 durchgeführte Audits an Bestandobjekten. Zur Ableitung von Gewichtungen und Priorisierungen der Kriterien wird die AHP Methode des Risikomanagements durchgeführt. Die Gewichtungen dienen weiterhin der Definition von verschiedenen Handlungsempfehlungen. Die vorliegende Arbeit untersucht dabei verschiedene Szenarien möglicher Gewichtungen und deren Auswirkung auf die jeweiligen Empfehlungen.

## 2 TAXONOMIE & ESG-KRITERIEN

Die EU-Taxonomie (Verordnung 2021/2139/EU) ist in sechs Umweltziele untergliedert, für die jeweils eine Delegierten Verordnung veröffentlicht wird. In den Delegierten Verordnungen sind die zu erfüllenden technischen Kriterien geregelt. Umweltziele:

- Wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz
- Anpassung an den Klimawandel
- Schutz von Wasser- und Meeresressourcen
- Übergang zur Kreislaufwirtschaft
- Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
- Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme

Damit eine Tätigkeit, die eines oder mehrere der sechs Ziele verfolgt, als nachhaltig eingestuft werden kann, darf sie keinem der anderen Ziele der Taxonomie erheblichen Schaden zufügen. Für jede Tätigkeit sind Schwellenwerte festgelegt, um zu definieren, ob sie einen signifikanten Schaden verursachen.

Die Anforderungen für Baugewerbe und Immobilien werden nach der Taxonomie (Pkt. 7) in die in Tab. 1 angeführten Bereiche unterteilt.

Tab. 1: Objektkategorien / Bereiche und Anforderungen aus „Wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz“

Kategorie	Einordnung	Anforderungen (Klimaschutz)
<b>7.1 Neubau</b>	Errichtung neuer Gebäude (ab 31.12.2020)	Primärenergiebedarf (PEB), der die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes definiert, liegt mind. 10 % unter nationalem NZEB-Standard
<b>7.2 Sanierung / Renovierung</b>	Entspricht größere Renovierung gemäß nationalen Bauvorschriften in Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie	Geltende Anforderungen aus Richtlinie 2010/31/EU. (Größere Renovierungen) Alternativ Verringerung PEB von mind. 30 %.
<b>7.3 Installation, Wartung und Reparatur von energieeffizienten Geräten</b>	Einzelne Renovierungsmaßnahmen, die in der Installation, Wartung oder Reparatur von energieeffizienten Geräten bestehen.	Geltende Anforderungen aus Richtlinie 2010/31/EU, Dämmung Gebäudehülle, Austausch Fenster, Türen, Lichtquellen, Effiziente Heizung, Klima und Lüftungstechnik, Wassersparende Armaturen
<b>7.4 Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Gebäuden</b>	Installation, Wartung und Reparatur von Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Gebäuden (und auf zu Gebäuden gehörenden Parkplätzen)	Installation, Wartung oder Reparatur von Ladestationen für Elektrofahrzeuge.
<b>7.5 Messung, Regelung und Steuerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden</b>	Installation, Wartung und Reparatur von Geräten für die Messung, Regelung und Steuerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden	Thermostate, Gebäudeautomatisierung und -steuerung, Energiemanagement, Intelligente Zähler, Sonnenschutz
<b>7.6 Technologien für erneuerbare Energien</b>	Installation, Wartung und Reparatur von Technologien für erneuerbare Energien vor Ort.	Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen, Windturbinen, Wärme- und Stromspeicher, Hocheffiziente Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmetauscher
<b>7.7 Erwerb und Eigentum von / an Bestand</b>	bis 31.12.2020 gebaut	Mindestens EPC-Rating A (Energieausweis) oder innerhalb der Top 15 % des nationalen oder regionalen Gebäudebestands in Bezug auf den Primärenergiebedarf. Belegt durch geeignete Nachweise, in denen mit nationalem oder regionalem Gebäudebestand verglichen wird. Dabei Differenzierung mindestens nach Wohngebäude und Nichtwohngebäude. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Für große Nichtwohngebäude (Wärme- und Kälteerzeuger mit Nennleistung > 290 kW) ist ein Energiemanagementsystem nachzuweisen.

Die ESG-Kriterien (Tab. 2) stehen für Environmental, Social und Governance (Umwelt, Soziales und Unternehmensführung) und sind ein Rahmenwerk für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Investitionen. Die ESG-Kriterien werden von Investoren verwendet, um zu bewerten, wie gut ein Unternehmen in Bezug auf Umwelt- und Sozialfaktoren sowie auf die Unternehmensführung abschneidet. Unternehmen, die gute ESG-Praktiken anwenden, haben oft ein geringeres Risiko für negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft und können langfristig eine höhere Rendite erzielen. (Larsen 2010)

Tab. 2: ESG Kriterien (in Anlehnung an Barady et al. 2023)

Environment	Social	Governance
Anpassungen an den Klimawandel (Risikobewertung von Klimaeinflüssen)	Gesundheit und Zufriedenheit	Unternehmensethik
Beitrag zum Klimaschutz (Energieeffizienz, Standard)	Sicherheit und Barrierefreiheit	Gesetzeskonformität
Biodiversität	Mobilität	Auswahl Vertragspartner
Gebäudesubstanz (Zustand, Materialien)	Nahversorgung	Reporting und Wissenstransfer
Energieeinsatz (Monitoring, Erneuerbare Energien, Verbrauch)		Regionale Wertschöpfung
Energietechnik (HKL, Beleuchtung)		
Abfall-, Wassereinsatz		
Organisation (Maßnahmenplanung)		

Die Kriterien für den Bereich Environment bilden den Schwerpunkt, wenn es um die Bewertung im Immobilienbereich geht. Für die Kriterien Social und auch Governance fehlt es der Literatur nach einer einheitlichen Definition. (Robinson & McIntosh 2022)

### 3 BEWERTUNGSVERFAHREN

#### 3.1 RATINGS UND SCORINGS

Rating- und Scoring-Systeme verwenden üblicherweise eine Bewertungsskala von 1 bis 10 oder 1 bis 5, je nach Art des zu bewertenden Aspekts. Diese Skalen ermöglichen eine differenzierte Darstellung von Sachverhalten und können auch eine Skalierung zur Feststellung des Vorhandenseins bestimmter Aspekte beinhalten. Allerdings können solche einfache binäre Entscheidungen keine ausreichende Differenzierung liefern. Insbesondere im Bereich der Dokumentation kann dies zu Problemen und Verzerrungen führen. Zum Beispiel bei der Frage, ob ein Energieausweis vorliegt: Bei Vorhandensein wird eine Bewertung von 100 % (ja) und bei Nicht-Vorhandensein eine Bewertung von 0 % (nein) vergeben. Diese Bewertung ist hinsichtlich der Erfüllung der Dokumentationsanforderungen korrekt, sagt aber nichts über die tatsächliche Nachhaltigkeit des Gebäudes aus. Ein Kriterium wie der Primärenergiebedarf (PEB), der eine direkte Verbindung zum Objekt hat, ist hier aussagekräftiger.

Durch die Vorgabe von Grenzwerten (Klasse A nach Energieausweis) oder ein alternativer Nachweis anhand der 15 % besten des nationalen oder regionalen Gebäudebestandes erzeugt ebenfalls wieder eine Wertung nach 0 oder 100 % (gegeben oder nicht gegeben). Andere Kriterien, wie die Wertung

von Standortrisiken (Hochwasser, Erdbeben, Wind etc.) kann jedoch nach mehreren Klassen erfolgen. (sehr gering bis sehr hoch)

Daher ist es wichtig, bei der Bewertung differenziert vorzugehen und Aspekte wie Dokumentationen und Befragungen zu berücksichtigen, die keinen direkten Einfluss auf das Objekt haben.

### 3.2 AHP MODELL

Das AHP-Modell steht für Analytic Hierarchy Process und ist ein Entscheidungsmodell, indem verschiedene Kriterien und Alternativen miteinander verglichen und gewichtet werden. Das AHP-Modell basiert auf einer hierarchischen Struktur, bei der das zu treffende Entscheidungskriterium ganz oben steht und in verschiedene Unterkriterien unterteilt wird. Diese Unterkriterien können wiederum in weitere Untergruppen aufgeteilt werden, bis schließlich die Alternativen auf der untersten Ebene angezeigt werden. (Saaty 1990)

Bei der Gewichtung der Kriterien und Alternativen werden paarweise Vergleiche durchgeführt, um ihre relative Wichtigkeit zueinander zu ermitteln. Die Paarvergleiche werden durch das Ausfüllen von Matrizen durchgeführt, in denen die Elemente den relativen Vergleich von Kriterien oder Alternativen widerspiegeln. Die Matrizen werden dann miteinander multipliziert, um ein Gesamtgewicht für jede Alternative zu erhalten. Das AHP-Modell (Tab. 3) kann in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden, wie beispielsweise im Projektmanagement, der Unternehmensstrategie, der Produktentwicklung, der Umweltplanung und vielen anderen Bereichen. Es bietet eine strukturierte Methode, um Entscheidungen zu treffen, die auf mehreren Kriterien basieren und somit eine umfassende Analyse ermöglichen.

Tab. 3: Bestimmung Priorität nach AHP Modell (Beispielhaft)

Skalenwert	Bedeutung					
1	gleiche Bedeutung					
3	etwas größere Bedeutung					
5	deutlich größere Bedeutung					
7	sehr viel größere Bedeutung					
9	absolut dominierend					
Kriterien	1	2	3	4	Summe	Priorität [%]
1	x	7	5	1/5	12,20	39
2	1/7	x	1/3	1/5	0,68	2
3	1/5	3	x	1/5	3,40	11
4	5	5	5	x	15,00	48

Tab. 3 stellt ein Beispiel zur Ermittlung einer Priorisierung anhand von 4 Kriterien dar. Dabei ist ersichtlich, dass die Kriterien 4 und 1 die höchste Priorität mit 48 bzw. 39 % erreichen. Die verwendete Skalierung von 1 bis 9 kann zur Anwendung entsprechend angepasst werden.

## 4 ERKENNTNISSE AUS DER DURCHFÜHRUNG VON ESG AUDITS

Die nachfolgenden Erfahrungen beziehen sich auf durchgeführte ESG Audits an einem Portfolio aus 15 Bestandobjekten. Die Bestandobjekte haben durchgehend dieselbe Nutzungsart, in Form von Dienstleistungsobjekten, eine durchschnittliche Größe von ca. 300 m<sup>2</sup>, ähnliche Ausstattungsstandards, jedoch differenzierte Standards hinsichtlich der Technik und der Objektqualität bzw. -zustand. Für die Erhebung bzw. Befundung der Gegebenheiten wurden folgende Klassifizierungen entsprechend der Kriterien verwendet (Tab. 4).

Tab. 4: Bewertungsraster Erhebung ESG Audits

Kriterium	Unterkriterien	Bewertung / Klassifizierung
Environment	Beitrag zum Klimaschutz (Energieausweis, CO <sub>2</sub> -Bilanz, Energieeffizienz)	Vorhanden, Teilweise-, Nicht vorhanden
	Anpassung an den Klimawandel (Klimarisiken)	Risikobewertung nach 4 Stufen (gering bis hoch)
	Gebäudesubstanz und Materialien Nutzung (Drittverwendungsfähigkeit)	Wertigkeit (Einfach, Durchschnitt, Hochwertig) <sup>1</sup>
	Energieeinsatz, Energietechnik, Biodiversität, Abfall und Wassereinsatz	Vorhanden, Teilweise-, Nicht vorhanden
Social	Gesundheit und Zufriedenheit Sicherheit und Barrierefreiheit Mobilität und Nahversorgung	Vorhanden, Teilweise-, Nicht vorhanden
Governance <sup>2</sup>	Gesetzeskonformität, Vertragspartner, Reporting und Wissenstransfer	Vorhanden, Teilweise-, Nicht vorhanden

1 Einordnung von Qualitäten und Zuständen (Stocker & Koch 2019)

2 Die Bewertung der Governance Kriterien erfolgte nicht objektspezifisch, sondern auf Portfolioebene.

Die einzelnen Kriterien wurden anhand der AHP-Methode bewertet. Eine vorhandene Nachhaltigkeits- oder ESG-Strategie kann bei der Bewertung unterstützend herangezogen werden. Durch die vorliegende Gewichtung der Kriterien lassen sich im Weiteren Handlungsempfehlungen priorisieren. Eine Herausforderung bei der Durchführung des Audits war die Einordnung von Verbräuchen oder Bedarfswerten (Energieausweis) als Primärenergie im Hinblick auf nationale oder regionale 15 %-Schwellenwerte. Hierfür sind in Zukunft jährlich angepasste und transparente Benchmarks unbedingt erforderlich.

## LITERATUR

- Baradiy S. et. al. (2023) Klimaneutrale Gebäude. Nachhaltigkeit bei Bestandimmobilien und Neubausprojekten. Forum Verlag Herkert. ISBN 978-3-96314-752-4
- Dorffleitner G., Halbritter G., & Nguyen M. (2015) Measuring the level and risk of corporate responsibility - An empirical comparison of different ESG rating approaches. *Journal of Asset Management*, 16(7), 450–466. <https://doi.org/10.1057/jam.2015.31>
- Larsen T. (2010) Implementing ESG in Private Real Estate Portfolios: The Case of U.S. and Pan-Europe Core Fund Managers. *Journal of Sustainable Real Estate*, 2(1), 249–267. <https://doi.org/10.1080/10835547.2010.12091806>
- Robinson S., & McIntosh M. (2022) A Literature Review of Environmental, Social, and Governance (ESG) in Commercial Real Estate. *Journal of Real Estate Research*
- Saaty T. (1990) Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. 2. Auflage. RWS Publishing, Pittsburgh, ISBN 0-9620317-2-0
- Stocker E. & Koch D. (2019) Die Modernisierung von Wohnungen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. In: ENOVA 2019, Pinkafeld
- Verordnung 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.06.2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088. L198/13
- Verordnung 2021/2139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04.06.2021 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852. L442/1

# Session 4c

## **Forschungshighlights Josef Ressel Zentrum LiSA**

### **Carbon Footprint - Fernkältebereitstellung mittels Kompressionskältemaschinen**

Rixrath, Schauer / Josef Ressel Zentrum / AT

Weber, Krail, Piringer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT

Buchner, Zisser / Wien Energie GmbH / AT

### **Numerical modelling and bi-objective optimisation of a CCHP process using low temperature heat sources**

Schittl, Sanz / TU Graz / AT

Krail, Krottil / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT

Zisser, Buchner / Wien Energie GmbH / AT

### **Lebenszyklusorientierte Kostenbewertung eines integrierten Energiesystems**

Rixrath, Schauer / Josef Ressel Zentrum / AT

Sabo, Piringer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT



# Carbon Footprint – Fernkältebereitstellung mittels Kompressionskältemaschinen

D. Rixrath<sup>1,2)</sup>, R. Weber<sup>1)</sup>, R. Schauer<sup>2)</sup>, J. Krail<sup>1)</sup>, G. Piringer<sup>1)</sup>, St. Buchner<sup>3)</sup>, G. Zisser<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

<sup>2)</sup> *Josef Ressel Zentrum für vernetzte Systembewertung einer nachhaltigen Energieversorgung, Pinkafeld, Österreich*

<sup>3)</sup> *Wien Energie GmbH, Austria*

**ABSTRACT:** District cooling networks are becoming increasingly popular as a means of meeting cooling demands in urban areas. Therefore, it is important to pay more attention to their impact on the environment. Compression chillers are a common technology used in such district cooling networks. To quantify their contribution to climate change, carbon footprints (CFs) are calculated. Footprint models are often based on annual average electricity mixes, which can mask temporal variations of a high share of renewables, as is the case in Austria. This work aims to quantify the CFs of operating compression chillers in a district cooling plant in Austria and to investigate the effects of using an hourly resolution of electricity mixes and load profiles, compared to an annual average mix.

This study presents the CFs of three large compression chiller units in an existing district cooling plant in Austria. Using data sets from 2019, hourly cooling load profiles for each unit were used to weigh the hourly Austrian electricity mix that supplies the chillers. The functional unit was defined as 1 MWh of cooling energy, as delivered to the district cooling network at the chillers' evaporators.

The CFs for each chiller are presented, analyzed and compared. This includes the impacts of the individual weighted electricity supply mixes (hourly or annual). Preliminary results indicate that load-induced differences in the supply mixes between the three units are as large as differences between results based on hourly resolved electricity mixes and those based on average annual electricity mixes.

The results demonstrate that CFs for large compression chillers should account for detailed operational data, particularly when the units are powered by electricity mixes that are rich in renewables. This would improve the quantitative basis for decision-making by cooling system managers.

## 1 EINLEITUNG

Fernkältenetze gewinnen zunehmend an Bedeutung, um den Kühlbedarf im urbanen Raum zu decken, somit rücken auch deren Umweltauswirkungen stärker in den Fokus. Kompressionskältemaschinen (KKM) sind eine gängige Technologie, die in solchen Netzwerken eingesetzt wird. Ihr Beitrag zum Klimawandel kann anhand ihres CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (Carbon Footprint, CF) quantifiziert werden.

Ein Großteil des CF einer KKM ist auf den Strombedarf zurückzuführen, der für ihren Betrieb erforderlich ist. Beispielsweise sind bei Kompressionswärmepumpen nach gleichem Betriebsschema je nach Betriebsweise 75 % bis 90 % der gesamten CF auf den Strombedarf zurückzuführen (Eicher et al. 2014; Li 2015). Die zugrundeliegenden Footprint-Modelle basieren zumeist auf einem durchschnittlichen jährlichen Strommix (Itten et al. 2012). Der Begriff bezeichnet hier die Anteile der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien am gesamten Verbrauch der Kältemaschine. Enthält der Strommix jedoch – wie in Österreich – größere Anteile erneuerbarer Energien, so kann der Effekt, den eine unterjährige zeitliche Variation durch variable Lastprofile auf die Ergebnisse hat, durch die Mittelung verdeckt werden. Im Jahr 2016 schwankten die Emissionen durch den verbraucherseitigen Strombedarf in Österreich zwischen 40 g CO<sub>2eq</sub>/kWh im Juni und 363 g CO<sub>2eq</sub>/kWh im Dezember, während der Jahresdurchschnitt bei 209 g CO<sub>2eq</sub>/kWh lag (Lunzer et al. 2018).

## 2 METHODE

### 2.1 BETRIEB UND LASTPROFILE

Die drei in Folge beschriebenen KKM (KKM 1 bis KKM 3) haben eine Gesamtnennleistung von 8,1 MW. Sie befinden sich in einer Fernkältezentrale mit einer Gesamtleistung von 19,8 MW. Die gesamte Kühlleistung der Zentrale wird durch eine Kombination aus Kompressions- und Absorptionskältemaschinen sowie durch Free Cooling in den kalten Wintermonaten bereitgestellt. Die Zentrale wiederum ist eine von 21 Fernkältezentralen, die das Fernkältenetz der Stadt Wien in Österreich mit einer Gesamtkälteleistung von rund 200 MW versorgen (Wien Energie s.a.).

Die Studie basiert auf Daten aus dem Jahr 2019. Tab. 1 zeigt die jährlichen Betriebsparameter für die einzelnen KKM. KKM 2 und KKM 3 haben dieselbe Nennleistung, während KKM 1 eine geringere Nennleistung aufweist. KKM 2 liefert die größte Kältemenge, gefolgt von KKM 1. Die Diskrepanz zwischen der Kältemenge von KKM 2 und KKM 1 folgt in etwa ihrer Nennleistung. KKM 3 stellt nur eine geringe Kältemenge bereit. Alle drei Kältemaschinen haben eine vergleichbare Jahresarbeitszahl (EER), die hier als Verhältnis von Kühlleistung zu Strombedarf definiert ist.

Tab. 1: Jährliche Kälteleistung und Strombedarf der drei Kompressionskältemaschinen, einzeln und gesamt. Pumpenstrom nicht inbegriffen. Daten von Wien Energie GmbH (2022).

Kältemaschine	Nennleistung, $MW_{th}$	Jährlicher Kälteoutput, $MWh_{th}$	Betrieb, jährlicher Strombedarf, $MWh_{el}$	EER, ohne Einheit
KKM 1	1,70	2.335	357	6,54
KKM 2	3,20	4.498	630	7,14
KKM 3	3,20	436	64	6,81
Gesamt	8,10	7.269	1.051	6,92

Für die KKM lagen keine gemessenen Stromverbrauchsdaten mit zeitlicher Auflösung vor, daher wurden die erforderlichen Werte berechnet. Die Kühlleistung wurde basierend auf Versorgungsdaten (Wien Energie GmbH 2022) anhand des Massenstroms sowie der Eingangs- und Ausgangswassertemperaturen am Kondensator bzw. Verdampfer der Kältemaschine berechnet. Diese Werte lagen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vor. Da die Strommixdaten nur in Stundenschritten verfügbar waren, wurden die Versorgungsdaten über vier Viertelstundenwerte gemittelt und damit ebenso in eine stündliche Auflösung übergeführt. Um den stündlichen Stromverbrauch der KKM zu erhalten, wurde die stündliche Leistungszahl ( $COP_{real}$ ) aus der theoretischen Carnot-Leistungszahl ( $COP_{carnot}$ ) berechnet. Das Verhältnis zwischen den beiden COP-Werten wurde anhand von sieben gemessenen  $COP_{real}$ -Werten, die in den Datenblättern der Kältemaschinen für verschiedene Betriebspunkte angegeben sind, für jede Stunde interpoliert. Der Interpolation lag eine Polynomfunktion 2. Grades zugrunde.

Die berechneten stündlichen Stromverbräuche der KKM ergaben für das Jahr 2019 unterschiedliche Lastprofile (Abb. 1).

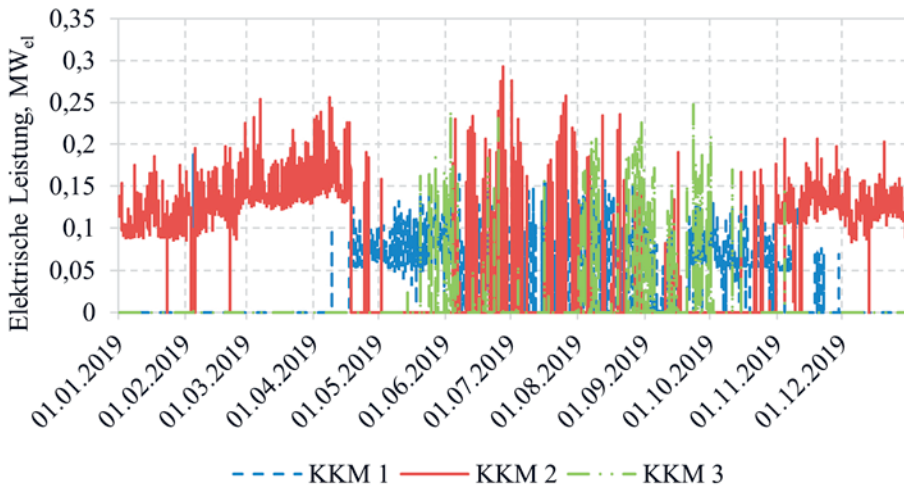


Abb. 1: Lastprofil der drei Kältemaschinen für das Jahr 2019

KKM 1 wurde abgesehen von kurzen Phasen hauptsächlich in der wärmeren Jahreszeit eingesetzt. Bis Mitte April war KKM 1 nicht in Betrieb und ab November ging der Betrieb von KKM 1 wieder deutlich zurück. In der kühleren Jahreszeit wurde die benötigte Kälte fast vollständig vom KKM 2 bereitgestellt. Über den Sommer war KKM 2 nur teilweise in Betrieb, und zwei weitere Unterbrechungen waren von Mitte April bis Anfang Juni und von Mitte September bis Anfang November zu verzeichnen. Ab November lieferte KKM 2 die Hauptkühlleistung. KKM 3 wurde im Sommer und im Herbst eingesetzt.

Für die Wasserpumpen, die die Kältemaschinen mit Kühl- und Kaltwasser versorgen, wurde angenommen, dass der stündliche Stromverbrauch proportional zum stündlichen Strombedarf der Kältemaschinen ist. Der Anteil wurde aus dem nominellen Stromverbrauch von Pumpe bzw. Kältemaschine abgeleitet.

## 2.2 STÜNDLICH GEWICHTETER STROMVERBRAUCHSMIX IN ÖSTERREICH

Für die Modellierung des österreichischen Strommixes wurden Daten aus dem Jahr 2019 von electricityMap (electricityMap 2022) verwendet. Diese Daten enthielten stündliche Stromdaten zu Verbrauch, Produktion, Import und Export in Österreich. Zusätzlich wurden stündliche Daten zum Verbrauchsmix aus Deutschland und Tschechien verwendet. Für die Modellierung des CF der Kältemaschinen wurden deren Lastprofile, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, stündlich gewichtet. Das Ergebnis waren kältemaschinenspezifische, stündlich gewichtete Stromverbrauchsmixe. Diese gewichteten Stromverbrauchsmixe wurden in drei Schritten erarbeitet:

Aus dem Lastprofil jeder einzelnen Kältemaschine wurde zunächst für jede Stunde der Gewichtungsfaktor ( $f_i$ ) der Stunde ( $i$ ) berechnet. Der Gewichtungsfaktor beschreibt das Verhältnis des stündlichen Stromverbrauchs zum jährlichen Stromverbrauch der Kältemaschine.

Im nächsten Schritt wurden die technologiespezifischen Anteile der Stromproduktion in Österreich mit dem entsprechenden stündlichen Gewichtungsfaktor  $f_i$  gewichtet und über das Jahr aufsummiert. Dadurch ergab sich der mit dem Lastprofil gewichtete Anteil eines Energieträgers aus österreichischer Produktion am österreichischen Stromverbrauchsmix. Ein Beispiel zur Veranschaulichung (Berechnung nach electricityMap 2022): Am 15. Juli 2019 um 11:00 Uhr verbrauchte KKM 1  $0,091 \text{ MWh}_{el}$ . Wird der Strombedarf von KKM 1 zu dieser Stunde dem gesamten Jahresenergiebedarf von  $357 \text{ MWh}_{el}$  gegenübergestellt, ergibt sich für diese Stunde ein Gewichtungsfaktor  $f_i$  von  $2,5 \cdot 10^{-4}$ . Anschließend

wurde der Wasserkraftanteil am österreichischen Stromproduktionsmix in dieser Stunde (38,05 %) mit dem Gewichtungsfaktor  $f_i$  multipliziert, was einen gewichteten Wasserkraftanteil von 0,01 % in der betrachteten Stunde ergibt. Diese stundengewichteten Anteile wurden anschließend über das gesamte Jahr aufsummiert, um den mit dem Lastprofil gewichteten Anteil der Wasserkraft an der österreichischen Stromproduktion zu erhalten. Dies wurde für jede Stromerzeugungstechnologie durchgeführt, um den mit dem Lastprofil der KKM stündlich gewichteten österreichischen Stromproduktionsmix zu erhalten.

Im dritten Schritt wurde die gleiche Vorgehensweise für die Importe aus Deutschland und Tschechien durchgeführt, um die importierten lastgewichteten Stromverbrauchsmixe nach Österreich darzustellen. Importe aus anderen Nachbarländern (CH, HU, SI, NO-IT) machten weniger als 2 % des gesamten gewichteten Stromverbrauchs aus und wurden daher mit ihren Jahresdurchschnitts-Verbrauchsmixen aus der ecoinvent-Datenbank (Wernet et al. 2016) modelliert, ohne Gewichtung durch Lastprofile. Stromexporte aus Österreich in die Nachbarländer wurden vernachlässigt, da sie konzeptionell aus dem gleichen Mix bestehen wie der nationale Verbrauchsmix.

### 2.3 CARBON FOOTPRINT-MODELL

Der CF der KKM setzt sich aus der Bereitstellung von Strom für die Kältemaschinen, der Produktion der Kältemaschinen einschließlich des Kältemittels sowie den Emissionen aus jährlichen Kältemittelverlusten zusammen. In allen drei KKM wird das Kältemittel R134a verwendet. Die jährlichen Kältemittelverluste während des Betriebs wurden basierend auf Literaturangaben mit 2 % der Füllmenge (TGA+E, 2021) angenommen. Für die Produktion der KKM wurde der ecoinvent-Prozess „heat pump production, brine-water, 10kW | heat pump, brine-water, 10kW | Cutoff, U – RER“ herangezogen und an die Massen der Kältemaschinen angepasst. Dazu wurden die Massen der einzelnen Materialien des ecoinvent-Prozesses hochskaliert, um die Gesamtmasse der jeweiligen KKM zu erhalten.

Die funktionelle Einheit wurde mit 1 MWh Kälte festgelegt, die vom Verdampfer der Kältemaschine an das Fernkältenetz geliefert wird. Die LCA-Modellierung wurde mithilfe der Software open-LCA Version 1.10.3 (GreenDelta GmbH, Berlin, Deutschland) durchgeführt und umfasste angepasste Prozesse aus der ecoinvent-Datenbankversion 3.8 (Cut-off; Wernet et al. 2016). Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wurde mit einem Zeithorizont von 100 Jahren unter Verwendung der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H), Wirkungskategorie Globale Erwärmung, charakterisiert.

## 3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 3.1 GEWICHTETER STROMMIX

Die Zusammensetzung des Stromverbrauchsmix variiert teilweise beträchtlich zwischen den einzelnen Kältemaschinen (Abb. 2).

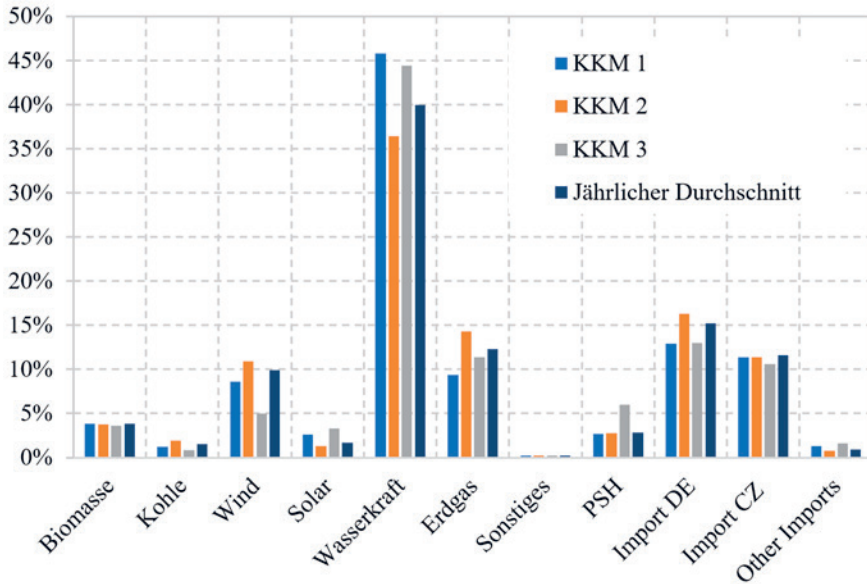


Abb. 2: Stromverbrauchsmixe der Kältemaschinen KKM 1 bis KKM 3, gewichtet nach den Lastprofilen der einzelnen Kältemaschinen, im Vergleich zu einem (ungewichteten) österreichischen Strommix im Jahresmittel. 100 % = gesamter jährlicher Verbrauch für eine Kältemaschine oder für ganz Österreich. Basierend auf Daten von 2019 (electricityMap 2022). PSH = Pumpspeicherwasserkraft; Sonstiges = Stromerzeugung unbekannt; Sonstige Importe = Importe aus der Schweiz, Slowenien, Ungarn, Norditalien.

Bei einem Vergleich der nach den Lastprofilen gewichteten Verbrauchsmixe von KKM 1 und KKM 2 mit dem Jahresdurchschnittsmix ist die absolute Differenz der jeweiligen Windkraftanteile eher gering. Im gewichteten Verbrauchsmix von KKM 3 ist der Windkraftanteil jedoch nur etwa halb so groß wie im Jahresdurchschnittsmix, nämlich 5 % gegenüber 10 % (100 % = Gesamtverbrauch der Kältemaschine). Die größten absoluten Abweichungen zwischen den stundengewichteten Verbrauchsmixen der verschiedenen Kältemaschinen und dem österreichischen Jahresdurchschnittsmix treten bei Wasserkraft auf. Die größte Abweichung vom Jahresmittel beträgt dabei etwas mehr als 5 % bei KKM 1, gefolgt von KKM 2 und KKM 3. Der Erdgasanteil am stundengewichteten Verbrauchsmix ist bei KKM 1 und KKM 3 im Vergleich zum Jahresdurchschnitt geringer, während der Erdgasanteil bei KKM 2 leicht höher ist. Die Importe aus Deutschland sind für KKM 1 und KKM 3 in etwa gleicher Höhe geringer als der Jahresdurchschnitt, während der Wert für KKM 2 höher ist. Insgesamt sind die Anteile der fossilen Stromerzeugung und der fossilreicheren Importe aus Deutschland und Tschechien für KKM 2 höher als der Jahresdurchschnitt, jedoch niedriger für KKM 1 und KKM 3.

### 3.2 UMWELTAUSWIRKUNGEN DER KÄLTBEREITSTELLUNG

Wie eingangs erwähnt, ist ein Großteil des CF einer KKM auf die Treibhausgasemission bei der Erzeugung des nötigen Betriebsstromes zurückzuführen. Die Unterschiede in den zugrunde liegenden Stromverbrauchsmixen führen daher zu Unterschieden in den CF-Ergebnissen der untersuchten KKM (Tab. 2). Während der stündlich gewichtete Verbrauchsmix von KKM 1 und KKM 3 zu einem geringeren CF führt, ergibt sich für KKM 2 ein höherer CF. Als zusätzliche Vergleichsbasis wurden die CFs auch mit dem österreichischen Jahresdurchschnittsmix aus der ecoinvent-Datenbank berechnet.

Diese CFs sind vergleichbar mit denen, die auf den Jahresdurchschnittsdaten von electricMap basieren, jedoch um etwa  $7 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}_{\text{th}}$  höher. Interessanterweise zeigt sich für die kombinierte Kühlleistung nur ein geringer Unterschied (weniger als 0,1 %) zwischen den stündlich gewichteten und den Jahresdurchschnitts-CFs von electricMap. Das lässt sich mit gegenläufigen Abweichungen vom Jahresdurchschnitts-CF bei KKM 1 und KKM 2 erklären (Tab. 2), wobei KKM 2 ihre geringere Abweichung durch eine höheren jährlichen Kälteoutput (Tab.1) kompensiert. KKM 3 ändert das wegen ihres geringen Outputs nur unwesentlich.

Tab. 2:  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck (CF) für die einzelnen Kompressionskältemaschinen und die gesamte Kühlleistung in  $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}_{\text{th}}$  Kühlleistung, basierend auf drei verschiedenen Stromverbrauchsmixen. Prozentangaben: Stundengewichtete CFs = 100 %.

Kältemaschine	Stündlich gewichteter Mix (electricityMap)	Jahresdurchschnittsmix (electricityMap)	Jahresdurchschnittsmix (Ecoinvent) <sup>1</sup>
KKM 1	46,79	52,26 (+11,70 %)	59,06 (+26,23 %)
KKM 2	50,70	47,82 (-5,68 %)	54,04 (+6,59 %)
KKM 3	75,37	76,43 (+1,40 %)	82,95 (+10,06 %)
Gesamte Kühlleistung	50,92	50,96 (+0,08 %)	57,39 (+12,70 %)

<sup>1</sup>) ecoinvent Prozess “market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – AT”, entspricht dem österreichischen Verbrauchsmix

Bei Betrachtung der Beiträge der einzelnen Kältemaschinen zur kombinierten Kälteleistung (Tab. 3) fällt auf, dass zwar die Differenz zwischen den CFs auf Basis des Jahresdurchschnittsmixes und des stündlich gewichteten Verbrauchsmixes sehr gering ist (+ 0,08 % in Tab. 2), jedoch Unterschiede in den Beiträgen der einzelnen Kältemaschinen zu diesen CFs erkennbar sind. Bei Verwendung des stündlich gewichteten Verbrauchsmixes ist der Anteil von KKM 2 geringer (-5,76 %), während der Anteil von KKM 1 und KKM 3 höher ist (+11,62 % bzw. +1,35 %).

Tab. 3: Beitrag der verschiedenen Kältemaschinen zum Gesamtergebnis für den CF und prozentuale Abweichung bezogen auf den Jahresmittelmix in Abhängigkeit vom eingesetzten Strommix. Prozentangaben: Stundengewichtete CFs = 100 %.

Kältemaschine	Stündlich gewichteter Mix %	Jahres- durchschnittsmix %	Abweichung (stündlich gewichtet = 100%) %
KKM 1	29,51	32,94	+11,62
KKM 2	61,61	58,06	-5,76
KKM 3	8,88	9,00	+1,35

Die Ergebnisse in Tab. 2 und Tab. 3 lassen sich durch die Kombination aus schwankenden stundengewichteten Stromverbrauchsmixen über das Jahr hinweg und den unterschiedlichen Betriebszeiten der Kältemaschinen erklären (Abb. 3).

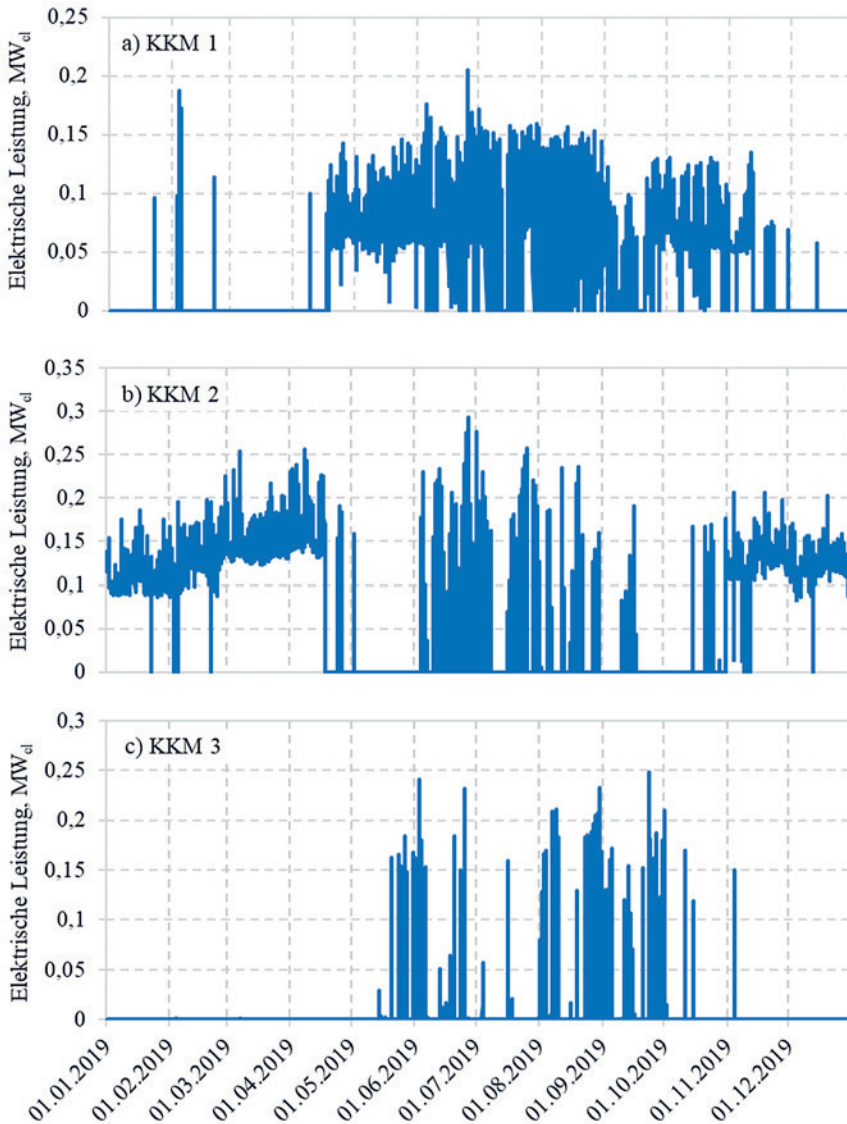


Abb. 3: Lastgang der drei Kältemaschinen (a-c; KKM 1 bis KKM 3) im Jahr 2019.

KKM 1 war hauptsächlich in den Sommermonaten in Betrieb (Abb. 3 a), in denen typischerweise ein höherer Anteil an Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energien im österreichischen Strommix enthalten ist. Da in den Sommermonaten der Anteil von Strom aus Erdgas in Österreich und die Importe aus Deutschland tendenziell geringer sind als im Jahresdurchschnitt, ist der Gesamt-CF für KKM 1 im Vergleich zum Jahresdurchschnitt niedriger.

Im Gegensatz dazu wurde KKM 2 hauptsächlich in den Wintermonaten betrieben (Abb. 3 b), wenn Wasserkraft und Solarenergie einen relativ geringen Anteil am Strommix haben. Dem gegenüber stehen größere Anteile an fossilem Erdgas und Importen aus Deutschland und Tschechien im Strommix, was

zu einem höheren CF-Beitrag führt. Somit führt die Verwendung des stündlich gewichteten Strommix zu einem geringen Anteil an Strom aus Wasserkraft aus Österreich im Vergleich zum Jahresdurchschnittsmix, jedoch zu einem höheren Anteil an Strom aus Erdgas und Importen aus Deutschland. Dies resultiert in einem höheren Gesamt-CF. Allerdings wird dieser Effekt durch höhere Windkraftbeiträge in den kälteren Jahreszeiten abgemildert.

KKM 3 deckt die Spitzenlasten ab, die insbesondere im Sommer und Herbst auftreten (Abb. 3 c). Dadurch ergibt sich im stündlich gewichteten Verbrauchsmix ein Rückgang von Strom aus Wind, Erdgas und Importen aus Deutschland im Vergleich zum Jahresdurchschnittsmix. Allerdings steigt bei der stündlichen Gewichtung der Anteil von Strom aus Wasserkraft, Solarenergie und Pumpspeicherkraftwerken. Insgesamt gleichen sich die Anteile von CO<sub>2</sub>-armer und CO<sub>2</sub>-reicher Stromproduktion aus und haben nur geringe Auswirkungen auf den CF-Beitrag.

Über das Jahr gleichen sich die drei Lastprofile weitgehend aus. Es lässt sich feststellen, dass bei kombinierter Kühlleistung aller drei Kältemaschinen der CF des stündlich gewichteten Stromverbrauchsmix und der CF des jährlichen Durchschnittsmix sehr ähnlich sind (Tab. 2, untere Reihe). Insbesondere die stündlich gewichteten Ergebnisse von KKM 1 und KKM 2 gleichen sich annähernd aus, da deren kombinierter Betrieb über das Jahr 2019 kontinuierlich verteilt war.

Die Beitragsanalyse (Tab. 4) zeigt den dominierenden Beitrag des Stromverbrauchs zum Gesamt-CF der KKM: Für KKM 1 und KKM 2 beträgt der Anteil des Stromverbrauchs am Gesamt-CF etwa 82 % bis 85 %, während der Anteil der Produktion der Kältemaschine bei rund 6 % und der CF durch Kältemittelverluste im Betrieb zwischen 8 % und 11 % liegt.

Tab. 4: Beitrag der Teilprozesse des Lebenszyklus zum Gesamt-CF der Kältemaschinen in Prozent für die verschieden gewichteten Strommixe.

	KKM 1			KKM 2			KKM 3		
	Stündlich	Jahresdurchschnitt	Ecoinvent	Stündlich	Jahresdurchschnitt	Ecoinvent	Stündlich	Jahresdurchschnitt	Ecoinvent
Strombedarf	82,31	84,16	85,98	85,16	84,27	86,08	54,63	55,25	58,77
Produktion	6,45	5,77	5,11	5,55	5,88	5,20	38,49	37,95	34,97
Kältemittelverluste	11,12	9,97	8,82	9,19	9,74	8,62	6,18	6,11	5,62

Bei KKM 3 ist der Beitrag des Stromverbrauchs weniger dominant und variiert zwischen etwa 54 % bis 58 %, während die Produktion mit 35 % bis 38 % und die Kältemittelverluste mit 5 % bis 6 % beitragen. Dies liegt daran, dass KKM 3 zur Abdeckung von Spitzenlasten dient und daher über die Lebensdauer deutlich weniger Kühlleistung liefert (Tab. 1). Dies hat zur Folge, dass sich die bei der Produktion verursachten Emissionen auf weniger MWh Kälteoutput verteilen, wodurch nicht nur deren Anteil am Gesamt-CF gemäß Tab. 4 erhöht wird, sondern auch der absolute Wert des spezifischen CF steigt (Tab. 2).

#### 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die Stromverbrauchsmixe variieren zwischen den einzelnen KKM. Der Unterschied zwischen den lastgewichteten Verbrauchsmixen der einzelnen Kältemaschinen und dem Jahresdurchschnittsmix ist bei der Wasserkraft am höchsten. Im gewichteten Verbrauchsmix von KKM 1 ist der Anteil um etwas

mehr als 5 Prozentpunkte höher als im Jahresdurchschnittsmix. Die Unterschiede in den zugrunde liegenden Stromverbrauchsmixen haben einen direkten Einfluss auf den spezifischen CF der untersuchten Kältemaschinen: Der Stromverbrauch dominiert den Gesamt-CF der Kältemaschinen (82 %, 85 % bzw. 55 % für KKM 1 bis KKM 3), gefolgt von weit geringeren Beiträgen durch die KKM-Herstellung und durch Kältemittelverluste. Bei KKM 1 und KKM 3 sind die lastgewichteten CF niedriger als die jahresdurchschnittlichen CF, während bei KKM 2 der lastgewichtete CF höher ist als der durchschnittliche CF. Der Jahresdurchschnitts-CF auf Basis von electricityMap-Daten ist um ca. 7 kg CO<sub>2eq</sub>/MWh<sub>th</sub> niedriger als der Jahresdurchschnitts-CF auf Basis des österreichischen ecoinvent-Strommixes.

Die Unterschiede der Stromverbrauchsmixe und den spezifischen CFs zwischen den einzelnen Kältemaschinen können durch die unterschiedlichen Betriebszeiten erklärt werden: KKM 1 wurde hauptsächlich in den Sommermonaten betrieben, wenn die Stromproduktion aus Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energien in Österreich tendenziell am höchsten ist. Im Gegensatz dazu wurde KKM 2 hauptsächlich in den Wintermonaten betrieben, wenn die österreichische Stromproduktion aus erneuerbaren Energien geringer ist. KKM 3 war im Sommer und im Herbst in Betrieb, wobei sich die unterschiedlichen Erzeugungscharakteristiken dieser beiden Jahreszeiten weitgehend ausgleichen. Dies führt bei dem gewichteten Verbrauchsmix von KKM 3 zu relativ geringen Abweichungen zu den Jahresdurchschnittsergebnissen. Dies gilt auch für die kombinierte Kälteleistung aller drei Kältemaschinen zusammen.

Insgesamt zeigt die Studie, dass die Verwendung eines jährlichen Durchschnittstrommix anstelle eines zeitaufgelösten Stromverbrauchsmix die CO<sub>2</sub>-Bilanz von KKM unter- oder überschätzen kann, im hier vorgestellten Fall in einer Bandbreite von -5,68 % bis +11,70 %. Solche Abweichungen lassen sich bei genauerer Betrachtung saisonaler Schwankungen im (erneuerbaren) Strommix und einem Vergleich mit den Lastprofilen der Kältemaschinen gut erklären. Nach Kenntnis der Autor:innen ist dies die erste Untersuchung des Einflusses saisonal schwankender Strommixe auf saisonal schwankende Lasten auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz großer industrieller Kältemaschinen. Im hier untersuchten Fall heben sich gegensätzliche Ergebnisse für einzelne Kältemaschinen weitgehend auf. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies eher die Ausnahme als die Regel ist. Überall dort, wo variable Strommixe auf variable Lastprofile treffen, kann eine zeitaufgelöste Berechnung des Carbon Footprints die Genauigkeit solcher Berechnungen – möglicherweise erheblich – verbessern.

## DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Diese Arbeit wurde auch von der Wien Energie GmbH, der Burgenland Energie AG und der FH Burgenland GmbH unterstützt.

## LITERATUR

- Eicher S., Hildbrand C., Kleijer A., Bony J., Bunea M., Citherlet S. (2014): Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating, Energy Procedia, Vol. 48, S. 813 – 818
- electricityMap (2022): Reduce carbon emissions with actionable electricity data. Verfügbar in: <https://www.electricitymaps.com/> [Abfrage am 01.07.2022]
- Itten R., Frischknecht R., Stucki M. (2012): Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid Version 1.3, Paul Scherrer Institut, Villigen
- Li G. (2015): Comprehensive investigations of life cycle climate performance of packaged air source heat pumps for residential application, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, S. 702 – 710

- Lunzer H., Busswald P., Niederl F., Barnthaler J., Stenglein A., Wind G. (2018): Zeitaufgelöste spezifische Treibhausgase beim Strombedarf: 15. Symposium Energieinnovation, 4.-16.02.2018 in Graz
- TGA+E (2021): Leckageraten von Kältemitteln: Sind Klimaanlage Klimakiller? Verfügbar in: <https://www.tga-fachplaner.de/klimatechnik/niedrig-gwp-kaeltemittel-leckageraten-von-kaeltemitteln-sind-klimaanlagen-klimakiller> [Abfrage am 01.07.2023]
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): over-view and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wien Energie GmbH (s.a.): Fernkälte: Klimafreundlich kühlen. Verfügbar in: <https://positionen.wienenergie.at/projekte/waerme-kalte/fernkaelte/> [Abfrage am 28.03.2022]
- Wien Energie GmbH (2022): Unveröffentlichte Technische Unterlagen und Monitoringdaten der Wien Energie GmbH. Wien Energie GmbH, Wien

# Numerical modelling and bi-objective optimisation of a CCHP process using low temperature heat sources

F. Schittl<sup>1,2)</sup>, W. Sanz<sup>2)</sup>, J. Krail<sup>1)</sup>, R. Krottil<sup>1)</sup>, G. Zisser<sup>3)</sup>, St. Buchner<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *University of Applied Sciences Burgenland, Department Energy and Environment, Pinkafeld, Austria*

<sup>2)</sup> *Graz University of Technology, Institute of Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics, Graz, Austria*

<sup>3)</sup> *Wien Energie GmbH, Vienna, Austria*

**ABSTRACT:** In this work, a new concept for a combined cooling, heating and power (CCHP) system is proposed, driven by low temperature thermal energy (e. g. geothermal or low temperature waste heat). The overall process can be divided into two sections, whereby one section is responsible for the production of cooling energy and the other for the production of electricity. A joint condensation section serves as the interface between the two sub-processes, in which both the residual heat from the power process as well as that from the cold steam jet process is released. A numerical simulation model is created for the investigation of the process with the help of the IPSEpro® software. In addition to the thermodynamic models, cost balance equations are also applied, which together with the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> law efficiency evaluations provide the basis for the optimisation. Via the COM (component object model) interface, the process model is coupled with the optimisation algorithms available in MATLAB®. Optimal operating points with regard to energy efficiency and system costs are determined with the help of simple bi-objective optimisation calculations. The results show that a maximum exergy efficiency of about 55 % is achieved within the set limits. Here, the system is operated predominantly in power-led mode and achieves an electrical power generation of approx. 7.6 kW. For the maximum cooling power (approx. 299 kW), the exergy efficiency drops to about 54 %. In addition, the investigations show that a maximum of the heat source temperature (430 K) or the turbine inlet pressure (176 bar) does not necessarily lead to the best result in terms of exergy efficiency or costs. Furthermore, a design point is extracted from the Pareto front using interactive multi-criteria decision methods (MCDM).

## 1 INTRODUCTION

Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) systems using low temperature heat sources have emerged as a promising solution for enhancing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions in various applications, including residential and commercial buildings, industrial processes, and district energy systems (Wu & Wang 2006). The motivation behind utilizing low temperature heat sources, such as waste heat from industrial processes, geothermal energy or solar thermal energy, is to tap sustainable and cost-effective options for meeting the energy needs of different sectors. These CCHP systems offer the potential for higher energy utilization efficiency, reduced reliance on fossil fuels and decreased environmental impact (Iglesias Garcia et al. 2018). However, there are challenges associated with CCHP systems supplied by low temperature heat sources, including the need for advanced system design (Yang et al. 2022) and control strategies to optimize the performance of CCHP systems (Lingmin et al. 2023), as well as the integration of intermittent and variable heat sources. Additionally, economic viability, environmental impact, and scalability of low temperature CCHP systems need further investigation to ensure their successful deployment in different settings (Moghimi et al. 2018).

Wang et al. (2022) developed a transcritical CO<sub>2</sub> process for low-grade energy recovery, which simultaneously meets the requirements for the provision of cooling, heating and power. The process combined an ejector refrigeration cycle with a CHP system. The new cycle was compared with a conventional cycle using a throttle valve instead of an ejector. The calculations showed that the ejector cycle could generate more power than the conventional cycle. A cogeneration system by Xu et al. (2015) was modified with the use of supercritical CO<sub>2</sub>. This system combines a Brayton cycle, a tran-

scritical ejector refrigeration cycle and an additional extraction turbine. The higher extraction rate and the higher extraction pressure cause an increase in the cooling capacity. With the extraction turbine, an improvement in exergy efficiency (compared to the system without extraction turbine) in the range of 10.4 % to 22.5 % was achieved. A novel geothermally driven CHP system has been proposed by Zare & Rostamnejad Takleh (2020), combining the transcritical CO<sub>2</sub> ejector cycle with a conventional Rankine cycle. The proposed system was then modified by replacing the gas cooler with an internal heat exchanger. The results show that this replacement improved the exergy efficiency, net power output and cooling output by 30.9 %, 49.1 % and 75.8 %, respectively. In addition, the heating power was reduced by 39.1 %.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2.1 PROCESS DESCRIPTION

Fig. 1 shows the novel CCHP cycle, whereby the process can be divided into a bottom cycle for the production of cooling energy and a top cycle for the generation of electricity. The joint condensation of the working medium represents the connection between the two sub-cycles. Depending on the temperature level, this condensation heat can either be used as useful heat, e. g. for space heating (SH) or released into the environment as waste heat (WH). Carbon Dioxide (R744) is used as the working fluid.

The top cycle consists of a high-pressure compressor (HP-COM), a steam generator (SG) powered by a low temperature heat source and an expander unit (EXP). After increasing the pressure of the medium to supercritical conditions ( $p > p_{cr}$ ), heat is added isobarically in the following heat exchanger (SG) to raise the temperature to a higher level (between 140 and 200 °C). The expander converts the enthalpy drop into mechanical energy and transfers it to an asynchronous generator via a conversion gear. After the steam has been expanded, mixing takes place at medium pressure level in the condensation cycle.

In the evaporator (EVA) of the bottom cycle, the working fluid is first evaporated with the addition of heat in order to cool the cold water (6/12 °C), which can be used for air conditioning, for instance. The liquid refrigerant supplied to the ejector (EJE) as a motive flow then draws in the suction vapour generated by the evaporator according to the principle of momentum exchange, thus causing a slight increase in the pressure level (compared to the evaporation pressure) of the resulting mixed vapour. The two-phase mixture emitted by the ejector is then divided into its liquid and gaseous components in a separator (SEP) according to the vapour quality. The latter is taken in by a low-pressure compressor (LP-COM), raised to the appropriate condensation pressure and then mixed with the exhaust steam from the top cycle. The liquid phase from the separator is returned to the evaporator via an expansion valve (V).

In the middle section of the process, the refrigerant vapour leaving the top and bottom cycle is now mixed and fed to a condenser (CON). There, the working fluid flow is liquefied while releasing heat and fed back to the two circuits according to the operating point. The condensation heat can be used to either preheat heating water or just be released to the environment. In this work, the condensation heat is used for the domestic hot water production and thus a temperature level of 30/65 °C is used.

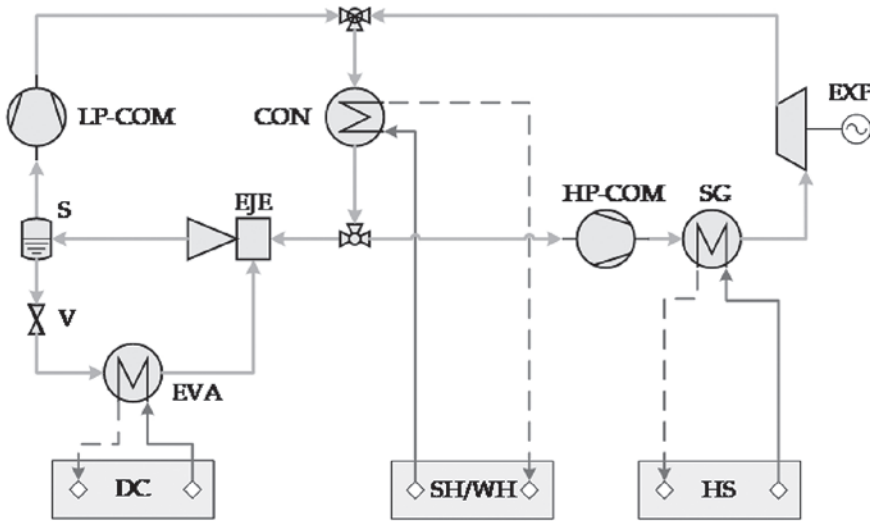


Fig. 1: Schematic representation of the novel CCHP cycle for low temperature heat sources

## 2.2 TECHNO-ECONOMIC MODELLING

### 2.2.1 Thermodynamic Assessment

A steady-state analysis of the plant is used for the investigations. This approach neglects all time-dependent variables (e. g.  $dt/dt$ ), which leads to a vast simplification of the simulation model. Nevertheless, basic knowledge about the boundary conditions as well as information about the thermodynamic relationships of the individual components is required to obtain a valid process model. In general, these laws can be represented by the steady-state formulation of the conservation equations for mass and energy (equ. 1 and 2). In these equations,  $\dot{m}$ ,  $\dot{Q}$  and  $\dot{W}$  denote the mass flows entering and leaving a component, the heat flows transferred and the technical power expended, respectively. The specific enthalpy  $h$  as well as the kinetic and potential energy of the mass flows are considered appropriately in the energy conservation. The conservation of momentum is linearized as far as practicable by using pressure losses or pressure loss coefficients.

$$0 = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \left[ \dot{m}_{in} \left( h + \frac{u^2}{2} + zg \right) \right] - \sum \left[ \dot{m}_{out} \left( h + \frac{u^2}{2} + zg \right) \right] \quad (2)$$

Tab. 1 lists the component-specific boundary conditions. Geometric information is often required for the exact calculation of the heat transport processes. Here the application of the minimum temperature gradient is used, which is also called pinch point  $\Delta T_{pp}$ . This temperature difference limits the heat exchange between the two separate working media. To consider the deviations of adiabatic and reversible changes of the fluid state in e. g. compressor, so-called isentropic efficiencies  $\eta_{is}$  are introduced. These are formed from the ratio of real to ideal change of state and can be obtained from the relevant literature (Liu & Groll 2013; Shah & Sekuli 2003).

Tab. 1: Assumed component-specific boundary conditions for the simulation of the CCHP

quantity	unit	value
electrical / mechanical efficiency $\eta_{el/mech}$	-	0.98
isotropic efficiency (COM, EXP) $\eta_{is,COM/EXP}$	-	0.80
ejector efficiencies (nozzle, mixing, diffuser) $\eta_{n/m/d}$	-	0.90/0.95/0.80
internal/external pressure losses $\Delta p_{in/ext}$	bar	0.01/0.1
pinch point temperatures $\Delta T_{pp,EVA/CON/SG}$	K	2/10/10
mean heat transfer coefficients ( $H_2O/CO_2$ ) $\bar{\alpha}$	W/(m <sup>2</sup> K)	5000/2000
domestic hot water mass flow rate $\dot{m}_{DHW}$	kg/s	3.0

The second law analysis of a system serves to identify thermodynamic inefficiencies. Indicators necessary for this are, for example, the exergy efficiency  $\eta_{ex}$ . The exergy efficiency is defined by the so-called product exergy  $\dot{E}_P$  and the exergy of the resource (fuel)  $\dot{E}_F$ . The term  $\dot{E}_P$  describes the desired product generated by the system (cooling, heating and expander power), while  $\dot{E}_F$  serves as a hypemym for all applied resources exergy needed to generate that product (heat source and auxiliary power for compressors).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_{DHW} + \dot{E}_{DC} + \dot{W}_{EXP}}{\dot{E}_{HS} + \dot{W}_{COM}} \quad (3)$$

### 2.2.2 Economic Assessment

To ensure an optimal system design, information on exergy efficiency alone is often not sufficient. Therefore, in addition to the efficiency evaluations, another assessment criterion is established that represents the economic aspects of the system. This methodology is also known as techno-economic analysis and subsequently leads to a multi-criteria optimisation problem in which not only the exergy efficiency is to be maximised, but also the costs are to be minimised. That requires an estimation of the investment costs of the plant, whereby component-related cost correlations (i. e. Lemmens 2016) are used here due to the lack of data. The total cost rate  $\dot{Z}$  (in €/h) of a component, consisting of the investment costs and the operating and maintenance costs, can then be determined from the capital recovery factor (CRF) using equ. 4. The operating hours  $N$  and the maintenance factor  $\varphi$  are determined by values of 8000 h and 1.06, respectively. The annual interest rate  $i$  is assumed to be 5 %, while the life cycle depreciation period  $\tau$  is assessed to be 20 years. (Dincer et al. 2017)

$$\dot{Z} = Z \frac{CRF \cdot \varphi}{N} \quad (4)$$

## 2.3 BI-OBJECTIVE OPTIMISATION

In general terms, the non-linear optimisation problem to be solved, which can be derived from the process model, can be described according to equ. 5. In it,  $f_k(x)$  denotes the objective functions to be optimised and  $x$  the associated variable vector with its limits  $x_L$  and  $x_U$ . In addition, inequality constraints  $g(x)$  and equality constraints  $h(x)$  can be defined. The objective functions are to be minimised by satisfying all equality and inequality constraints.

$$\min_{x \in X} [f_1(x), f_2(x)] \quad (5)$$

The objective functions or constraints chosen for this optimisation task can be found in Tab. 2. The “gamutobj” algorithm available in MATLAB® is used to solve the bi-objective optimisation problem. Additional solver-specific settings are the maximum number of generations (25), the population size (100) as well as the fraction of the population at the next generation, that the crossover function (0.6) creates.

Tab. 2: Specifications and constraints of the bi-optimisation problem

variable	unit	$x_{init}$	$x_L$	$x_U$	$f$
$\eta_{ex,tot}$	%	-	-	-	max
$\dot{Z}_{tot}$	€/h	-	-	-	min
$\dot{m}_{DC}$	kg/s	2.0	0.2	12.0	-
$p_{EXP,in}$	bar	150	100	180	-
$T_{HS,in}$	K	413.15	373.15	473.15	-

### 2.4 MULTI-CRITERIA DECISION MAKING

Since bi- or multi-objective optimisation does not provide a single design point, but a whole set of optimal solutions (the Pareto set), a specific solution must be chosen from this set in order to carry out further investigations, e. g. partial load behaviour. A common method in multi-criteria decision analysis is the so-called TOPSIS method (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). This technique ranks the alternatives (Pareto set) according to the distances to the so-called ideal solution and the non-ideal solution. The aim is to find the solution that has the smallest distance to the ideal solution and the largest distance to the non-ideal solution. The individual steps of the TOPSIS procedure can be taken from the following list in accordance to Yadav et al. (2019).

- Construction of normalized decision matrix, where  $r_{ij}$  and  $x_{ij}$  are the elements of normalized and original decision matrix, respectively.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \tag{6}$$

- Construction of weighted normalized decision matrix  $v_{ij}$ , where  $w_j$  is the assigned weight to the attribute.

$$v_{ij} = r_{ij}w_j \quad \forall i, j \tag{7}$$

- Determination of ideal  $A^+$  and non-ideal solutions  $A^-$ , where  $I$  and  $I'$  are assigned to the benefit and cost attributes, respectively.

$$A^+ = \{v_i^+\} = \left\{ \max_{j,i \in I} (v_{ij}), \min_{j,i \in I'} (v_{ij}) \quad \forall j \right\} \tag{8}$$

$$A^- = \{v_i^-\} = \left\{ \min_{j,i \in I} (v_{ij}), \max_{j,i \in I'} (v_{ij}) \quad \forall j \right\} \tag{9}$$

- Calculation of separation measure  $S_i^+$  and  $S_i^-$ .

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad \forall j \tag{10}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad \forall j \tag{11}$$

- Calculation of relative closeness to the ideal solution  $C_j^+$  as well as ranking of alternatives based on the values of  $C_j^+$ .

$$C_j^+ = S_j^+ / (S_j^+ + S_j^-) \quad (12)$$

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 OPTIMISATION RESULTS

Fig. 2 shows the results of the bi-objective optimisation in terms of the Pareto front (left) and the corresponding parameter space (right). As described in Tab. 2, both the exergy efficiency  $\eta_{\text{ex,tot}}$  and the investment costs of the total system  $Z_{\text{tot}}$  were declared as objective functions. The associated decision variables for the optimisation are presented by means of the system parameters district cooling mass flow, heat source temperature as well as turbine inlet pressure. The range of values shown is limited by the constraints  $x_L$  and  $x_U$  of the optimisation problem. Fig. 2 shows that the total cost of the CCHP system increases moderately as the exergy efficiency increases to about 52 %. A further increase in the total exergy efficiency raises the cost significantly. Moreover, the maximum exergy efficiency is shown to be present at the top right design point (DP1, about 55.4 %), while the cost peaks at this point (191k €). On the other hand, the minimum value for the system cost is at the design point at the bottom left (DP2) and is about 172k €. DP1 represents the optimal scenario when the exergy efficiency is the only objective function, while DP2 leads to the optimal design when the total system cost is the only objective function. The design point DP3 (bottom right) gives the ideal solution for bi-objective optimisation, as both objective functions have their optimal values, i. e. highest exergy efficiency and lowest total cost rate. Since that point is not on the Pareto frontier and thus cannot be reached, it is now necessary to find the optimal design point.

The right plot shows the three-dimensional parameter space associated with the Pareto front, consisting of turbine inlet pressure, heat source temperature and external district cooling mass flow. In addition, the magnitude of the exergy efficiency is indicated by colouring the points. As can be clearly seen from the diagram, the exergy efficiency increases significantly with increasing turbine inlet pressure and heat source temperature. Nevertheless, the maximum calculated heat source temperature remains far below the limits specified. The cost minimum of  $Z_{\text{tot}}$  is reached at approx. 114 bar and 377 K. As the heat source temperature increases, the inlet pressure at the expander also rises, whereby the peak of  $\eta_{\text{ex,tot}}$  is reached at approx. 174 bar and 403 K. It is noticeable that the mass flow of the district cooling hardly changes except for two outliers (6.7 and 8.2 kg/s) and fluctuates around its initial value of about 2 kg/s. The reason for this is the relatively small contribution of the cold production to maximising the exergy efficiency as well as the reduction of costs when the evaporator is reduced in size. The maximum cooling and turbine capacities on the Pareto front are 208 and 50 kW, respectively. However, taking into account the points that are not on this front,  $\dot{Q}_{DC}$  and  $\dot{W}_{EXP}$  reach about 299 and 92 kW, respectively. However, it should be noted that the other product decreases strongly in each case. For the maximum cooling output, the turbine power amounts just 5.7 kW. The net electrical output drops to -97 kW, which indicates that a chiller-like operation is selected for high cooling capacities.

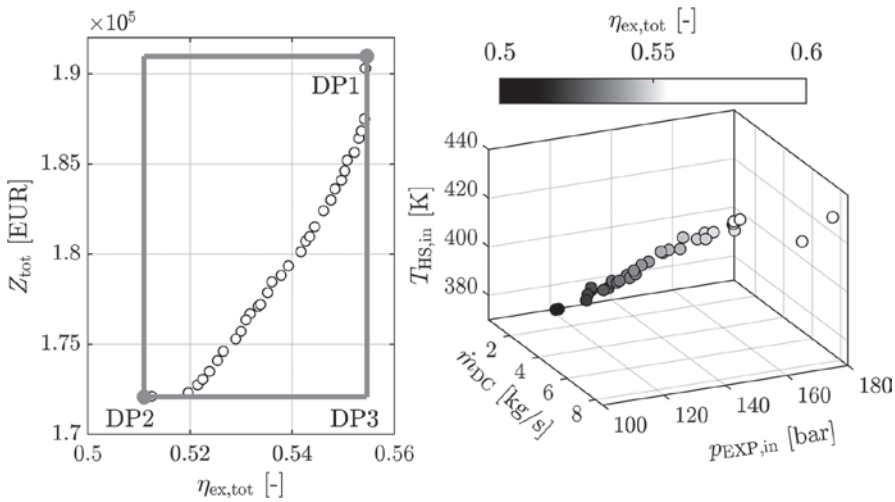


Fig. 2: Left: Pareto set of solutions optimised according to exergy efficiency and investment costs. Right: Parameter space of Pareto set

### 3.2 MULTI-CRITERIA DECISION MAKING RESULTS

At the beginning of the TOPSIS analysis, it must be decided which range of decision preferences is to be covered. This is done by introducing the preference range parameter and generating weighting distributions, one favouring the first objective and the corresponding one favouring the second criterion (Jankowski et al. 2020). In this work, the criterion weights are set as  $w_1 = 0.9$ ,  $w_2 = 0.1$  and  $w_1 = 0.1$ ,  $w_2 = 0.9$ , respectively. The resulting design points are shown in Fig. 3 (top), complemented the design point calculated by assigning  $w_1 = 0.5$ ,  $w_2 = 0.5$ . In the next step, that objective function which represents a priority criterion must be determined (in that case  $f_1 = \eta_{\text{ex,tot}}$ ). Finally, a decision can be made whether to consider further design points or to mark the last choice as the final solution (final DP). To get a deeper insight into the choices made, Fig. 3 (bottom) shows the design points corresponding to the different weights  $w_1$ . As can be seen from the diagram, the objective functions are very sensitive to weights in the range between 0.4 and 0.7. Therefore, a detailed analysis of the impact of the weights on the objective functions is necessary to ensure the requirements of a reliable decision process.

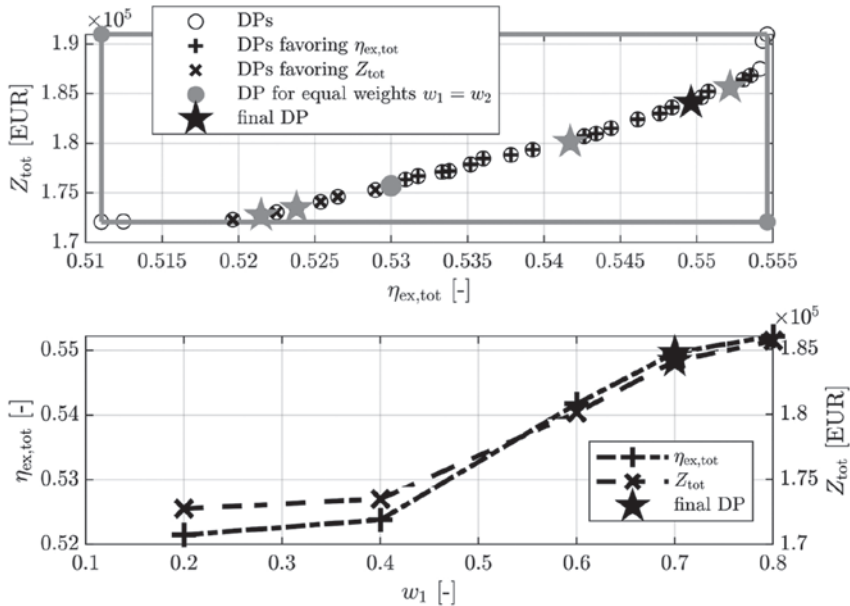


Fig. 3: Results of the MCDM process including Pareto front with marked design points (top) and values of the objective functions for selected weight distributions (bottom)

## 4 CONCLUSION

The results of the simulations of the CCHP process show that (with fixed boundary conditions on the condensation side; 439 kW) sufficient cooling or heating capacity can be provided for a single consumer (e. g. hospital) by using low-temperature heat. With a primary heat input of approx. 49 kW, 299 kW of cooling power can be produced in the cooling-led operating mode, while approx. 7.6 kW of net electrical power (with 441 kW of primary heat input) can be produced in the power-led operating mode. The system is characterised by its high exergy efficiency (up to 55 %) and the flexible operating modes and thus represents an alternative to e. g. pure heat pumps or chillers. However, it is recommended to use additional evaluation methods (e. g. detailed exergy analysis) in order to detect inefficiencies in the cycle, take measures and thus further increase the cycle efficiency. Furthermore, the work shows the application of bi-objective optimisation algorithms for energy system design as well as the correlation between an efficient system and its costs. Furthermore, the study demonstrates how multi-criteria decision making processes can be used to find an optimal system design, even if they cannot completely eliminate the subjectivity of the user (e. g. importance of efficiency vs. costs).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out as part of the Josef Ressel Centre for Linked System Assessment to Support Sustainable Energy Supplies (LiSA). The financial support by the Austrian Federal Ministry for Digital and Economic Affairs, by the National Foundation for Research, Technology and Development, by the Christian Doppler Research Association, and by the project partners Burgenland Energie AG and Wien Energie GmbH is gratefully acknowledged.

## LITERATURE

- Dincer I., Rosen M. A. & Ahmadi P. (2017) Optimization of Energy Systems. Wiley.
- Iglesias Garcia S., Ferreira Garcia R., Carbia Carril J. & Iglesias Garcia D. (2018) A review of thermodynamic cycles used in low temperature recovery systems over the last two years. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 81, pp. 760–767. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.049.
- Jankowski M., Borsukiewicz A. & Hooman K. (2020) Development of Decision-Making Tool and Pareto Set Analysis for Bi-Objective Optimization of an ORC Power Plant. *Energies* 13, p. 5280. doi: 10.3390/en13205280
- Lemmens S. (2016) Cost Engineering Techniques and Their Applicability for Cost Estimation of Organic Rankine Cycle Systems. *Energies* 9 (7), p. 485. doi: 10.3390/en9070485.
- Lingmin C., Jiekang W., Huiling T., Feng, J. & Yanan W. (2023) A Q-learning based optimization method of energy management for peak load control of residential areas with CCHP systems. *Electr. Power Syst. Res.* 214 (4), p. 108895. doi: 10.1016/j.epsr.2022.108895.
- Liu F. & Groll E. A. (2013) Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles. *Appl. Therm. Eng.* 52 (2), pp. 360–370. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.12.001.
- Moghimi M., Emadi M., Ahmadi P. & Moghadasi H. (2018) 4E analysis and multi-objective optimization of a CCHP cycle based on gas turbine and ejector refrigeration. *Appl. Therm. Eng.* 141 (10), pp. 516–530. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.075.
- Shah R. K. & Sekuli D. P. (2003) Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Wang M., Zhang J. & Liu H. (2022) Thermodynamic analysis and optimization of two low-grade energy driven transcritical CO<sub>2</sub> combined cooling, heating and power systems. *Energy* 249, p. 123765. doi: 10.1016/j.energy.2022.123765.
- Wu D. W. & Wang R. Z. (2006) Combined cooling, heating and power. A review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 32 (5-6), pp. 459–495. doi: 10.1016/j.peccs.2006.02.001.
- Xu X. X., Liu C., Fu X., Gao H. & Li, Y. (2015) Energy and exergy analyses of a modified combined cooling, heating, and power system using supercritical CO<sub>2</sub>. *Energy* 86 (12), pp. 414–422. doi: 10.1016/j.energy.2015.04.043.
- Yadav V., Karmakar S., Kalbar P. P. & Dikshit A. K. (2019) PyTOPS. A Python based tool for TOPSIS. *SoftwareX* 9 (1), pp. 217–222. doi: 10.1016/j.softx.2019.02.004.
- Yang X., Liu K., Leng Z., Liu T., Zhang L. & Mei L. (2022) Multi-dimensions analysis of solar hybrid CCHP systems with redundant design. *Energy* 253, p. 124003. doi: 10.1016/j.energy.2022.124003.
- Zare V. & Rostamnejad Takleh H. (2020) Novel geothermal driven CCHP systems integrating ejector transcritical CO<sub>2</sub> and Rankine cycles. Thermodynamic modeling and parametric study. *Energy Convers. Manag.* 205, p. 112396. doi: 10.1016/j.enconman.2019.112396.

Contact:

Florian Schittl

Tel. +43 5 7705-4152

florian.schittl@fh-burgenland.at

University of Applied Sciences Burgenland GmbH

Department Energy and Environment

Research Area Thermal Energy Technologies

Steinamangerstraße 21

A-7423 Pinkafeld, Austria



# Lebenszyklusorientierte Kostenbewertung eines integrierten Energiesystems

D. Rixrath<sup>2)</sup>, E. Sabo<sup>1)</sup>, R. Schauer<sup>2)</sup>, G. Piringer<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> FH Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

<sup>2)</sup> Josef Ressel Zentrum für vernetzte Systembewertung einer nachhaltigen Energieversorgung, Pinkafeld, Österreich

**ABSTRACT:** This study describes a practical approach to the economic assessment method of life cycle costing and its application to an existing energy system. Life cycle costing is frequently seen as a key part of sustainability assessment, as it covers the economic aspect in the triple-bottom line concept of sustainability. The objective was to first develop a practical version of the method and then to test its applicability on a case study. The case study energy system is a heating plant that supplies a district heat (DH) network in Neusiedl in the Austrian province of Burgenland.

For the practical version of the life-cycle oriented cost assessment, the Life Cycle Costing (LCC) method was selected in combination with elements from the Environmental Life Cycle Costing (ELCC) method, which largely follows the LCA methodology. For the processing of the cost data, the net present value method was applied, as well as the ÖNORM guidelines of ÖNORM 15459-1:2017 for life cycle costing and economic efficiency calculations.

The case study heating plant is a biomass heating plant with a back-up gas boiler. It is supplemented by two water/water heat pumps and two air/water heat pumps which are supplied with electricity via a direct line from a nearby wind farm. The chosen functional unit was 1 MJ<sub>th</sub> of heat fed into the DH grid, with a calculation period of 20 years. The system boundary is limited to the components that are physically installed in the heating plant; the connected district heating network is not included. Costs include the energy expenditure and processes required for the plant's operation. The interest rate at the time the study of 1.813% was used as a constant discount rate for the entire period under review. A price development scenario was selected for the electricity price, which is based on long-term forecasts and excludes current, volatile developments. Wood chip and natural gas prices are based on values for the base year 2021.

The life cycle costs of the heating plant were € 0.023 per MJ<sub>th</sub> of heat. In the contribution analysis by component, air-to-water heat pumps (32.7% of total costs), biomass combustion (26.6%), and water-to-water heat pumps (23.4%) turned out to be the strongest cost drivers. The majority of life cycle costs (86.6%) are incurred in the operating phase; the remainder are almost exclusively initial capital expenditures. Of the operating expenses, 63.5% are accounted for by electricity costs (mostly for operating the heat pumps), followed by fuel and maintenance costs. A sensitivity analysis showed only a minor impact of varying initial investment costs on the result. Significant impacts on the result were found in the sensitivity analysis of the electricity price, and the sensitivity analysis of the discount rate showed the most significant impacts. A scenario calculation taking into account the current price and especially energy price development shows that life cycle costs could increase to about 143% of the base scenario under such short-term crisis conditions.

The present LCC study is intended to contribute to the sustainability assessment of an innovative power-to-heat project that is driving the decarbonization of the energy sector.

## 1 EINLEITUNG

Die Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis des 3-Säulen-Ansatzes (Elkington 1997) besteht aus einem ökologischen, einen ökonomischen und einem sozialen Bewertungsteil, der im besten Fall den gesamten Lebenszyklus von Produkten abbilden soll. In der vorliegenden Studie wird diskutiert, wie die Methode der Lebenszykluskostenrechnung auf Energiesysteme Anwendung finden kann. Dies soll an einer konkreten Fallstudie getestet werden.

Als Anwendungsbeispiel wurde mit einer lebenszyklusorientierten Kostenbewertung der ökonomische Teil der Nachhaltigkeitsbewertung für ein integriertes Energiesystem in Neusiedl im Burgenland erarbeitet. Das Energiesystem ist ein von der Energie Burgenland betriebenes Biomasseheizwerk mit einem Back-up Gaskessel. Das Heizwerk wurde im Rahmen des Projekts „Hybrid DH Demo“ zusätzlich mit einer Power-to-Heat Sektorkopplung in Form von zwei Wasser/Wasser- und zwei Luft/Wasser-Wärmepumpen ausgestattet, die über eine Direktleitung mit Strom aus dem Windpark Neusiedl/Weiden versorgt werden.

Die vorliegende LCC-Studie basiert auf einer Masterarbeit an der Fachhochschule Burgenland (Sabo 2023). Sie soll einen Beitrag zur Nachhaltigkeitsbewertung eines die Dekarbonisierung der Energiebranche vorantreibenden, innovativen Power-to-Heat Projekts leisten.

## 2 METHODE

### 2.1 KOSTENBEWERTUNG – ADAPTIERUNG DER LIFE CYCLE COSTING (LCC) METHODE

Für die lebenszyklusorientierte Kostenbewertung wurde die Life Cycle Costing (LCC) Methode in Verbindung mit Elementen aus der Environmental Life Cycle Costing (ELCC) Methode ausgewählt, welche weitgehend der Ökobilanzierungsmethodik (beschrieben in ISO 14040 2021) folgt (Hunkeler et al. 2008; Heijungs et al. 2013). Die LCC Methode berücksichtigt alle Phasen im Lebenszyklus eines Produktsystems, von der Konzeption und Rohmaterialgewinnung über Herstellung und Nutzung bis zur Entsorgung. Sie fasst diejenigen Kosten von Produkten und Systemen zusammen, die von einem oder mehreren im Lebenszyklus entscheidungstragenden Akteuren direkt getragen werden (Ciroth et al. 2016; Lichtenvort et al. 2008; White & Ostwald 1976). Für die Handhabung der Kostendaten wurden die ÖNORM-Leitlinien der ÖNORM 15459-1:2017 für Lebenszykluskosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen angewandt.

### 2.2 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES FALLSTUDIEN-ENERGIESYSTEMS

Das Heizwerk Neusiedl umfasst in seiner ursprünglichen Ausstattung einen Biomassekessel, einen Back-up Gaskessel und einen Pufferspeicher. Dies wurde im Rahmen des Projekts „Hybrid DH Demo“ (Klima- und Energiefonds 2018) über das bestehende Heizwerk mit weiterführenden Komponenten ergänzt, was einen „Energy-Hub“ mit diversen Möglichkeiten eines integrierten Energiesystems schafft (Abb. 1).

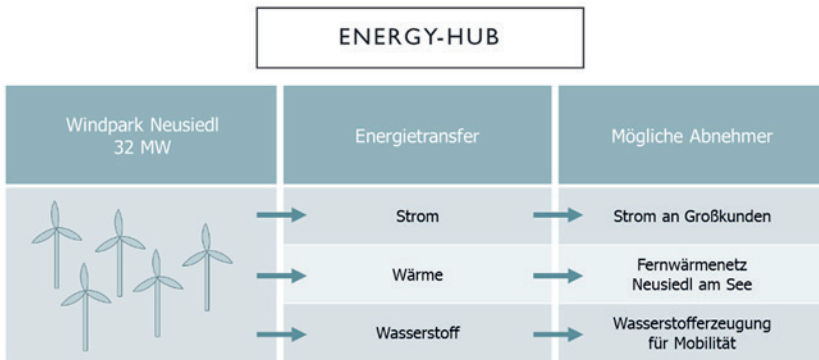


Abb. 1: Konzept des Energy-Hub in Neusiedl am See (nach: Award Energy Research 2020)

Im Wintermodus (Abb. 2) holt die im Abgasstrang des Biomassekessels (1) eingebaute RGK-Anlage (2) die Restenergie aus dem Abgas und liefert Niedertemperaturwärme mit rund 35 °C in den Kaltpeicher (3). Dieser wiederum versorgt zwei in Serie geschaltete Wasser-Wasser-Wärmepumpen (WWWP) (4b) als Wärmequelle. Die WWWP heben das Temperaturniveau auf 70 °C an und speisen den Warmspeicher (7). Zusätzlich werden zwei Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP) (4a) eingesetzt, um das Temperaturniveau im Warmspeicher (7) auf 85 °C anzuheben. Von dort aus wird die Wärme in die zwei Pufferspeicher (8) geleitet, die direkt in das Fernwärmenetz Neusiedl am See (9) einspeisen. Der elektrische Strom für alle vier WP wird über eine Direktstromleitung vom Windpark Neusiedl/Weiden (5) bezogen. Ein vorgeschalteter Stromspeicher aus vier Superkondensatoren (6) verhindert Schäden an den WP durch ein zu rasches Herunterfahren bei Unterbrechungen des Windstroms. Der Back-up Gaskessel soll nur zu Spitzenlastzeiten in Betrieb genommen werden.

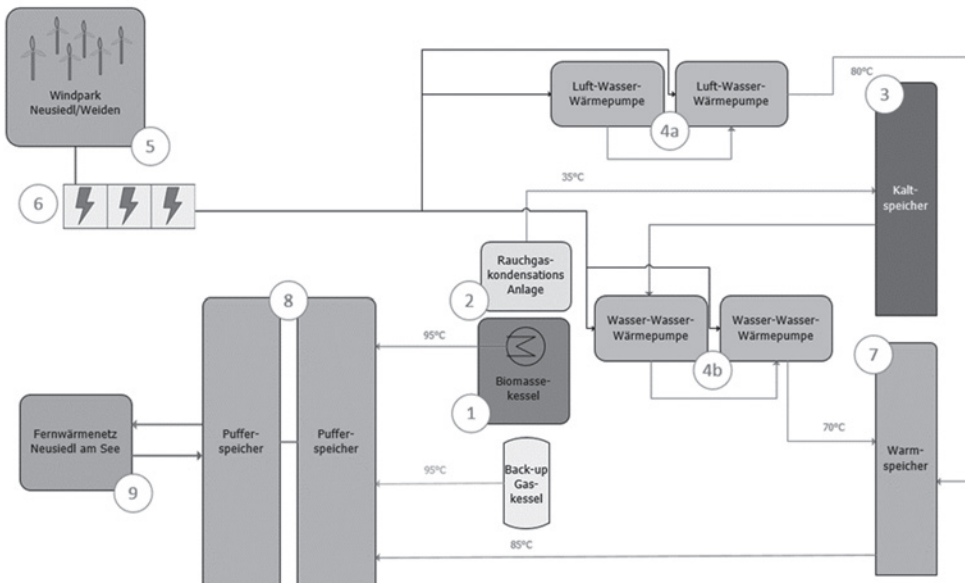


Abb. 2: Die Funktionsweise des Heizwerk Neusiedl im Wintermodus (Nummerierung der Komponenten dient der Beschreibung im Text)

Im Sommerbetrieb ist der Biomassekessel (1) nicht in Betrieb, somit steht der Rauchgaskondensator (2) nicht als Wärmequelle für den Kältspeicher (3) zur Verfügung. Stattdessen speisen die LWWP (4a) während den Sommermonaten in den Kältspeicher und stellen damit die Niedertemperaturwärme für die beiden WWWP (4b) bereit. Die anderen Anlagenkomponenten werden im Sommermodus wie im Wintermodus betrieben. Der Back-up Gaskessel soll, wie im Wintermodus, nur zu Spitzenlastzeiten in Betrieb genommen werden.

### 2.3 KOSTENBEWERTUNG – FUNKTIONELLE EINHEIT, SYSTEMGRENZEN, BE-RECHNUNGSMETHODE

Als funktionelle Einheit wurde 1 MJ produzierter Wärme vor der Einspeisung in das Fernwärmenetz Neusiedl gewählt.

Die Systemgrenze wird auf die physisch im Heizwerk Neusiedl verbauten und für die Funktion des Energiesystems relevanten Komponenten eingegrenzt, inklusive der für den Betrieb notwendige Energieaufwendungen und Prozesse. In Übereinstimmung mit der gewählten funktionellen Einheit wurde das angeschlossene Fernwärmenetz nicht einbezogen. Der Zeithorizont wird mit 20 Jahre festgelegt, um die erwartete wirtschaftliche Nutzungsdauer einer Wärmepumpe abzudecken.

Für die Berechnung der LZK (Lebenszykluskosten) wurde die Barwertmethode angewandt. Als konstanter Diskontierungszinssatz wurde der bei Erstellung der Studie neueste verfügbare Zinssatz von 1,813 % für den gesamten Betrachtungszeitraum zugrunde gelegt. Tab. 1 zeigt die in weiterer Folge verwendeten Indexierungs- und Diskontierungszinssätze.

Tab. 1: Für das Life Cycle Costing herangezogene Indexierungs- und Diskontierungszinssätze

Anwendungsbereich	Zinssatz pro Jahr (p.a.)	Quelle
Verbraucherpreisindex (VPI) <sup>1</sup>	2,0 %	(Statistik Austria, 2022a)
Transportkostenindex (TKI) <sup>1</sup>	2,3 %	(WKO, 2022)
Diskontierungszinssatz <sup>2</sup>	1,813 %	(OeNB, 2022)

<sup>1</sup> Gemittelte Kennwerte Österreich der Jahre 2017 bis 2021

<sup>2</sup> Sekundärmarktrendite des Bundes September 2022 (Durchschnittsrendite für Bundesanleihen)

Für den Strompreis wurden Preisentwicklungsszenarien gewählt (Abb. 3), welche auf langfristigen Prognosen beruhen (Haas et al. 2017). Die Auswirkungen der aktuellen, volatilen Entwicklungen wurden später durch eine Sensitivitätsanalyse abgebildet. Für die LCC Berechnung wird der Strompreis bis zum Prognosejahr 2030 entlang des Erwartungspreisszenarios (Entwicklungsprognose 2030, und ab 2031 standardmäßig indexiert und diskontiert herangezogen. Hackschnitzel- und Erdgaspreise beruhen auf Werten des Basisjahres 2021.

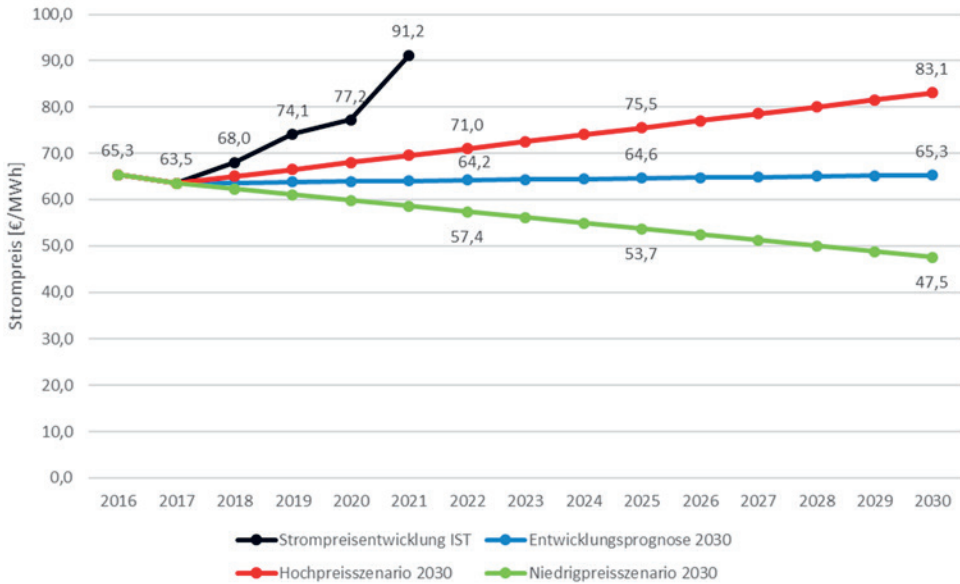


Abb. 3: Strompreisentwicklung IST 2016-2021 und Entwicklungsprognose 2018 bis 2030 inkl. Hochpreis- und Niedrigpreisszenario, netto exkl. Steuern und Abgaben ((nach Prognosedaten Haas et al., 2017; und nach Ist-Daten von Statistik Austria, 2022b)

Die jährlichen Instandhaltungskosten der technischen Komponenten wurde analog zur Empfehlung der ÖNORM EN 15459-1 (2017) für Wirtschaftlichkeitsberechnungen angenommen und liegen, abhängig vom Komponententyp, zwischen 1 % und 4 % der Anfangsinvestition. Die für das Gebäude jährlich anfallenden Instandhaltungskosten wurden analog der Beispielrechnung aus der ÖNORM B 1801-4 (2014) mit 0,82 % der Anfangsinvestition angenommen. Indexierung und Diskontierung der Instandhaltungskosten wurden nach den Werten in Tab. 1 vorgenommen.

Für die LCC-Berechnungen wurden die Programme Microsoft Excel und openLCA Version 1.11 (Green Delta GmbH, Berlin, Deutschland) genutzt.

### 3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

#### 3.1 LCC BERECHNUNGSMETHODIK

In Tab. 2 sind alle in der LCC berücksichtigten Komponenten der Fallstudie aufgelistet. Zudem sind die Anzahl an verbauten Komponenten pro Komponententyp und die Komponentengröße, wenn zutreffend, nach Masse, Nennleistung oder Volumen angegeben.

Tab. 2: Die in der LCC berücksichtigten Komponenten der Fallstudie, die berücksichtigte Stückanzahl und Komponentengröße nach Masse, Nennleistung oder Volumen (wo zutreffend)

Bezeichnung	Anzahl	Größe	Einheit
Biomassekessel	1	2 254	kW
Massenkraftabscheider und Gewebefilter*)	1	-	-
Wärmeübertrager	1	2 700	kg
	1	2 700	kg
Luft/Wasser Wärmepumpe Ochsner, Typ: Albatros ILWS 385 ER5c2	2	600	kW
Superkondensator (LWWP)	2	205	kW
Wasser/Wasser Wärmepumpe Ochsner, Typ: IWWHS 550 ER2c3	2	600	kW
Superkondensator (WWWP)	2	138	kW
Kältemittel R134a	-	144	kg
Kaltspeicher	1	17	m <sup>3</sup>
Warmspeicher	1	17	m <sup>3</sup>
Pufferspeicher	2	150	m <sup>3</sup>
Gebäude	1	1 100	m <sup>2</sup>
Grundstück	1	1 210	m <sup>2</sup>
Pumpe 4,0	3	4	kW
Pumpe 5,5	1	5,5	kW
Pumpe 7,5	2	7,5	kW
Pumpe 11,0	2	11	kW
Gaskessel (Back-up)	1	3 600	kW

\*) auf Nennleistung des Biomassekessels dimensioniert.

Die Lebenszyklus- bzw. Gesamtkosten (CG; Formel 3.1) setzen sich aus Anfangsinvestitionskosten, den Betriebskosten (im Zusammenhang mit dem Betrieb des Energiesystems anfallende Kosten) und den Entsorgungskosten zusammen.

$$CG = CO_{inv} + CO_{op} + CO_{disp} \quad (3.1)$$

$CO_{inv}$  = Anfangsinvestitionskosten

$CO_{op}$  = Betriebskosten

$CO_{disp}$  = Entsorgungskosten

Die Betriebskosten wiederum (Formel 3.2) bestehen aus den Instandhaltungskosten der Betriebsanlagen (inkl. Grundstückspacht) und den Energiekosten.

$$CO_{op} = CO_{ma} + CO_{en} \quad (3.2)$$

$CO_{mv}$  = Instandhaltungskosten

$CO_{op}$  = Energiekosten

Getroffene Annahmen und Vereinfachungen für die Berechnung:

- Alle Komponenten werden nach der wirtschaftlichen Lebensdauer fachgerecht entsorgt und durch eine neue Komponente derselben Qualität und denselben Kosten ersetzt
- Die Inflationsrate, die Kostenindizes und der Diskontierungszinssatz (Tab.1) bleiben über die Lebensdauer von 20 Jahren unverändert.
- Die Finanzierung aller Kosten zum Zeitpunkt ihrer Fälligkeit wird als gegeben angenommen, somit wurden keine weiteren Finanzierungskosten berücksichtigt.
- Das für in Zukunft bzw. nach dem Basisjahr 2021 anfallende Kosten eingesetzte Kapital kann bis zum Zeitpunkt der anfallenden Kosten so angelegt werden, dass eine Rendite in Höhe der umlaufgewichteten Durchschnittsrendite für Bundesanleihen erwirtschaftet wird (Tab.1)

Grundsätzlich ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse verschiedener LCC-Studien in seiner Aussagekraft limitiert, da die Ergebnisse von Energiepreisen und dem Zeitpunkt des Energieverbrauchs stark abhängig sind, wie auch O'Rear et al. (2019) anmerken.

### 3.2 LEBENSZYKLUSKOSTEN DES FALLSTUDIENSYSTEMS UND BEITRAGSANALYSE

Die Lebenszykluskosten des Heizwerk Neusiedl am See wurden für die Berechnungsperiode von 20 Jahren ermittelt und betragen unter den beschriebenen Rahmenbedingungen 0,023 € pro MJ eingespeiste Wärme.

In einer Beitragsanalyse werden die Lebenszyklusphasen und die Komponenten auf die stärksten Kostentreiber untersucht. In der Beitragsanalyse nach Komponenten (Abb. 4) stellten sich die Luft/Wasser-Wärmepumpen mit 32,7 % der Gesamtkosten, die Biomasseverbrennung (26,6 %) und die Wasser/Wasser-Wärmepumpen (23,4 %) als stärkste Kostenfaktoren heraus.

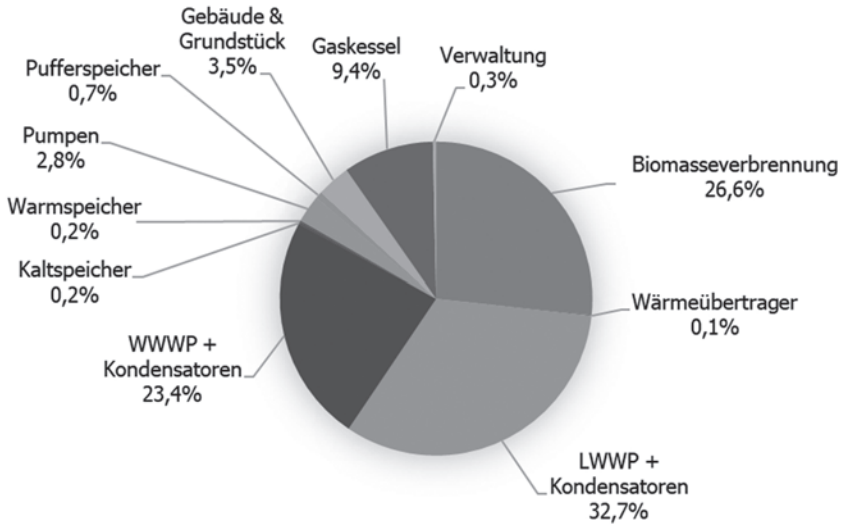


Abb. 4: Beiträge der Komponenten zu den Lebenszykluskosten in Prozent

Der überwiegende Anteil der Lebenszykluskosten (86,6 %) fällt in der Betriebsphase an; der Rest sind fast ausschließlich Anfangsinvestitionen (Abb. 5). Die Betriebsaufwände beinhalten 55 % Stromkosten (größtenteils für den Betrieb der Wärmepumpen), gefolgt von 27,2% Brennstoff- und 4,4 % Instandhaltungskosten.

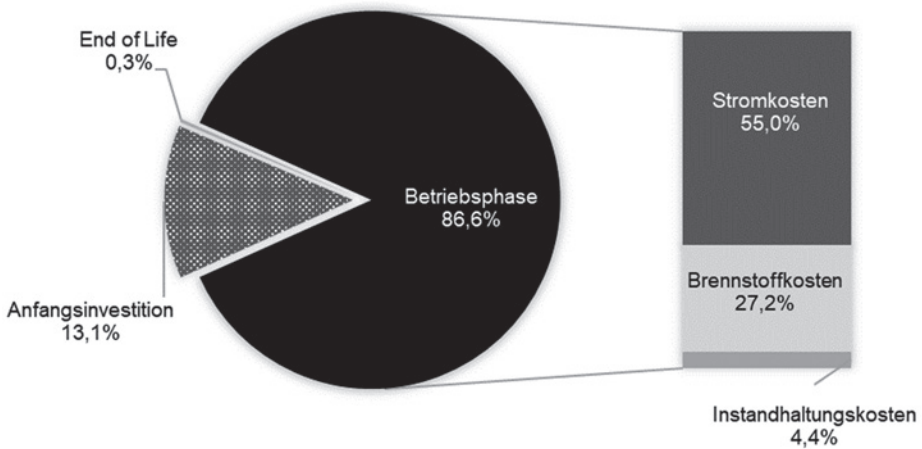


Abb. 5: Beiträge der Lebenszyklusphasen (Anfangsinvestition, Betriebsphase und End of Life) an den Lebenszykluskosten, gesonderte Darstellung der Beiträge innerhalb der Betriebsphase; Angaben in Prozent.

### 3.3 SENSITIVITÄTSANALYSE DER FALLSTUDIEN-LEBENSZYKLUSKOSTEN

Eine Sensitivitätsanalyse (Tab. 4) zeigte die bedeutendsten Auswirkungen für die Variation des Diskontierungszinssatzes. Wesentliche Auswirkungen auf das Ergebnis konnten auch bei der Sensitivitätsanalyse des Strompreises festgestellt werden. Nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis hatten variierende Anfangsinvestitionskosten.

Tab. 4: Sensitivitätsanalyse. Durchgeführte Parametervariationen sowie die Lebenszykluskosten (LZK) der Varianten in Prozent des Basisszenarios (=100%)

Kurzbezeichnung der Variante	Parameter	Parameter-variationen in %	LZK in % des Basisszenarios
AK -30	Anfangsinvestitionskosten	-30	96,2
AK +30		+30	103,8
D 1	Diskontierungszinssatz	1	107,8
D 5		5	77,0
D 7		7	66,7
D 9		9	58,9
SN-22,6	Strompreis	-22,6	87,6
SH+22,6		+22,6	112,4

Eine die aktuelle Preis- und vor allem Energiepreisentwicklung berücksichtigende Szenario-Rechnung (nicht in Tab. 4 gezeigt) ergibt, dass die Lebenszykluskosten unter solchen kurzfristigen Krisenbedingungen auf rund 143 % des Basisszenarios ansteigen könnten.

## 4 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Für die Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte einer lebenszyklusorientierten Nachhaltigkeitsbewertung für ein integriertes Energiesystem wurde die LCC-Methode in Kombination mit Elementen aus der ELCC-Methode sowie unter Anwendung von ÖNORM-Leitlinien für Lebenszykluskosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei der Handhabung der Kostendaten als geeignet befunden.

Das Hauptergebnis sind die berechneten LZK des Heizwerk Neusiedl für eine Berechnungsperiode von 20 Jahren. Bei der Einspeisung von 901,9 Mio. MJEW belaufen sich die LZK in Bezug auf die funktionelle Einheit auf 0,0234 €/MJEW. Die Ergebnisse dieser lebenszyklusorientierten Kostenbewertung sollen dabei helfen, die LZK von zukünftig geplanten innovativen integrierten Energiesystemen in einer ähnlichen Ausführung abschätzen zu können.

In der Beitragsanalyse nach Komponenten stellten sich die LWWP, die Biomasseverbrennung und die WWWP mit insgesamt 83 % der LZK als stärkste Kostentreiber heraus. Nach Lebenszyklusphase gereiht, fällt in der Betriebsphase mit rund 87 % der überwiegende Anteil der LZK an. Dafür sind, bei einem Blick auf die Prozessebene, überwiegend die Stromkosten für den Wärmepumpenbetrieb sowie die Hack-schnitzelkosten für die Biomasseverbrennung verantwortlich. Durch das Aufzeigen der stärksten Kostentreiber können mögliche Hebel für die Optimierung der LZK in zukünftigen ähnlichen Projekten ausgemacht werden. Hier liegt insbesondere im Bereich der Energiekosten ein wichtiger Steuerungsmechanismus.

In der Sensitivitätsanalyse zeigte sich eine geringe Auswirkung bei 30 % höheren oder niedrigeren Anfangsinvestitionskosten von rund 4 % der LZK. Die Variation des Diskontierungszinssatzes zwischen 1 % und 9 % führte zu Ergebnisschwankungen in Höhe von 108 % bis 59 % der LZK im Basisszenario,

was auf eine große Bedeutung der in Zukunft erwarteter Kosten hinweist. Die Strompreisvarianten des Nieder- und Hochpreisszenario wiesen ein um rund 12 % von den LZK des Basisszenario abweichendes Ergebnis nach oben und unten auf. Der Strompreisprognose, die die Basis für das Basisszenario und die Sensitivitätsanalyse Strompreis bildet, liegt ein optimistisches Erneuerbaren-Ausbau-Szenario zugrunde. Infolge des stärkeren Ausbaus der Erneuerbaren und einer dadurch saisonal divergierenden Erzeugungslage könnte es in Zukunft zu unterjährig stark variierenden Strompreisen kommen. Solche unterjährigen Schwankungen sind in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

In Anbetracht der wirtschaftlichen Lage in Österreich im Jahr 2022 sind die Ergebnisse der Studie abhängig von den weiteren wirtschaftlichen Entwicklungen und bei einer von den Prognosen abweichenden realen Entwicklung nicht mehr zutreffend. Das die aktuelle Preis- und vor allem Energiepreisentwicklung berücksichtigende Szenario zeigt, dass die Lebenszykluskosten unter den Krisenbedingungen auf rund 143 % des Basisszenarios, das auf Langzeitprognosen beruht, ansteigen könnten. Die tatsächlichen LZK des integrierten Energiesystems können aufgrund der erläuterten Unsicherheiten nur bei Durchführung einer Langzeitbeobachtung bis zum Ende des Lebenszyklus endgültig bestimmt werden.

Diese Arbeit stellt eine praktikable Methode für eine lebenszyklusorientierte Betrachtung des wirtschaftlichen Aspektes der Nachhaltigkeit vor. Sie ist darüber hinaus die erste lebenszyklusorientierte Kostenbewertung, die an der Fallstudienanlage Heizwerk Neusiedl durchgeführt wurde und legt damit den Grundstein für weiterführende Forschungsprojekte.

## DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie durch die Christian Doppler Forschungsgesellschaft.

## LITERATUR

- 4ward Energy Research (2020) Projektvorstellung Hybrid DH Demo. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=f5P-sFpXud0>
- Ciroth A., Hildenbrand J., & Steen B. (2016) Life Cycle Costing. In S. de Meester, R. A. F. Alvarenga, & J. Dewulf (Eds.), *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products – Methods and Case Studies* (pp. 215–228). Wiley.
- Elkington J. (1999) *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone
- Green Delta. (2020) openLCA 1.11 [Software].
- Haas, R., Resch, G., Burgholzer, B., Totschnig, G., Lettner, G., Auer, H., & Geipel, J. (2017) *Stromzukunft Österreich 2030 - Analyse der Erfordernisse und Konsequenzen eines ambitionierten Ausbaus erneuerbarer Energien*. [www.eeg.tuwien.ac.at](http://www.eeg.tuwien.ac.at)
- Heijungs R., Settanni E., & Guinée J. (2013) Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: Unifying LCA and LCC. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1722–1733. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0461-4>
- Hunkeler D., Lichtenvort K., & Rebitzer G. (2008) Preface: About This Book. In *Environmental Life Cycle Costing* (pp. xxi). SETAC, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Klima- und Energiefonds (2018) *Zur Sondierung einer hybriden Netzeinspeisung im städtischen Fernwärmesystem Neusiedl am See. Beschreibung des Konzeptes der hybriden Netzeinspeisung. Hybrid DH - Neusiedl Am See/Bgld.; D3.1 Konzeptbeschreibung*. <https://smartcities.at/projects/hybride-netzeinspeisung-neusiedl-am-see/>
- Lichtenvort K., Rebitzer G., Huppel G., Giroth A., Seuring S., Schmidt W.-P., Günther E., Hoppe H., Swarr T., & Hunkeler D. (2008) Introduction: History of Life Cycle Costing, Its Categorization,

- and Its Basic Framework. In D. Hunkeler K. Lichtenvort & G. Rebitzer (Eds.), *Environmental Life Cycle Costing* (pp. 1–16). SETAC, CRC Press, Taylor & Francis.
- OENORM B 1801-4. (2014) Bauprojekt- und Objektmanagement. Teil 4: Berechnung von Lebenszykluskosten. Austrian Standards Institute/Oesterreichisches Normungsinstitut.
- OENORM EN 15459-1. (2017) Energieeffizienz von Gebäuden - Wirtschaftlichkeits-berechnungen für Energieanlagen in Gebäuden. Teil 1: Berechnungsverfahren, Modul M1-14. Austrian Standards Institute/Oesterreichisches Normungsinstitut.
- OENORM EN ISO 14040. (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Austrian Standards Institute/Oesterreichisches Normungsinstitut.
- OeNB - Oesterreichische Nationalbank (2022) Renditen österreichischer Bundesanleihen. Zuletzt Abgerufen Am 02.08.2022 Um 16:58 Uhr. <https://www.oenb.at/Statistik/Standardisierte-Tabellen/zinssaetze-und-wechselkurse/renditen-oesterreichischer-bundesanleihen.html>
- O'Rear E., Webb D., Kneifel J., & O'Fallon C. (2019) Gas vs electric: Heating system fuel source implications on low-energy single-family dwelling sustainability performance. *Journal of Building Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100779>
- Sabo E. (2023): *Lebenszyklusorientierte Kostenbewertung eines integrierten Energiesystems*. Masterarbeit, Fachhochschule Burgenland
- Statistik Austria. (2022a) 04-Verbraucherpreisindex 2005. STATcube, Zuletzt Aufgerufen Am 08.08.2022 Um 11:54 Uhr. <https://statcube.at/statistik.at/ext/statcube/jsf/tableView/tableView.xhtml>
- Statistik Austria. (2022b) Inflation im Oktober 2022 auf 11 % gestiegen. Pressemitteilung.
- White G. E., & Ostwald P. F. (1976) LIFE CYCLE COSTING. *Management Accounting*, 57(7), 39–41.
- WKO (2022) Transportkostenindex. Indexentwicklung der Kostenstruktur. Fachverband Güterbeförderungsgewerbe, Zuletzt Abgerufen Am 07.09.2022 Um 13:55 Uhr. <https://www.wko.at/branchen/transport-verkehr/gueterbefoerderungsgewerbe/transportkostenindex.pdf>



# Session 5c

## Netze und Speicher

### **Unit Commitment für saisonale Speichertechnologien**

Schindler, Jasek, Medwenitsch, Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT  
Gnam / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT

### **Control-oriented test bed for mobile air conditioning systems**

Lösch, Fallmann, Kozek / TU Wien / AT

### **An international policy-oriented workstream for energy efficiency of Data centres**

Díaz Triana / ECODESIGN / AT



# Unit Commitment für saisonale Speichertechnologien

M. Schindler<sup>1)</sup>, L. Gnam<sup>2)</sup>, P. Jasek<sup>1)</sup>, K. Medwenitsch<sup>1)</sup>, M. Puchegger<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Forschung Burgenland GmbH, Campus 1, 7000 Eisenstadt*

<sup>2)</sup> *Fachhochschule Burgenland GmbH, Steinamangerstraße 21, 7423 Pinkafeld*

**ABSTRACT:** The transition to renewable energy generation is essential for achieving a carbon-neutral society, but it faces challenges due to the fluctuating nature of renewable energy sources. These fluctuations occur based on varying wind speed and insolation and can result in time periods where the energy production exceeds the demand, as well as time periods where the energy demand cannot be covered by these renewable energy sources. This issue is especially of seasonal character, as weather conditions vary significantly between summer and winter. In order to overcome this challenge, energy storage systems offer a solution by storing excess energy during high production periods and releasing it during low production periods, ensuring a continuous energy supply. Seasonal storages also provide the possibility to transfer surpluses from the summer to the winter. Different storage technologies, such as hydrogen and thermal storage, are being explored in this article. This study examines existing seasonal storage technologies using optimization models to assess their viability and capacity. The article discusses the use of storage systems in hybrid parks, comprising a 30 MW photovoltaic installation, a 30 MW wind farm, and 300 MWh of storage capacity. By defining three different scenarios, various strategies to install seasonal storages are explored. The operations are always price-optimized to maximize revenue based on the day-ahead price.

## 1 EINLEITUNG

Die Umstellung auf erneuerbare Energiebereitstellung ist der entscheidende Schritt auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Gesellschaft. Eine Herausforderung bei der Integration erneuerbarer Erzeugungsanlagen ist jedoch deren fluktuierende, von den Wetterbedingungen abhängige Produktion. In Zeiten geringer Sonneneinstrahlung oder geringer Windgeschwindigkeiten kann es hier zu einem Mangel an Energie kommen, während es auch Zeiträume gibt, in denen die Energieproduktion die Nachfrage übersteigt. Diese beiden Faktoren sind bedingt durch eine starke saisonale Schwankung bei erneuerbaren Erzeugungsanlagen. Eine Lösung für dieses saisonal bedingtes Problem besteht in der Nutzung von Energiespeichern. Diese ermöglichen es, überschüssige Energie in Zeiten mit hohem Angebot zu speichern und in Zeiten mit geringem Angebot wieder freizusetzen. Dies ist entscheidend für eine erfolgreiche Energiewende, da es dazu beiträgt, die Unbeständigkeit der erneuerbaren Energiequellen auszugleichen und eine kontinuierliche Energieversorgung zu gewährleisten. Neben dem Ausgleich kurzfristiger Schwankungen ist bei einer vollständigen Umstellung auf ein erneuerbares Energiesystem auch ein saisonaler Speicherbedarf gegeben, um u.a. solare Überschüsse aus dem Sommer in den Winter zu bringen. Abb. 1 zeigt hier anhand eines Szenarios für 2050 die monatlichen Fehlmengen und Überschüsse für Wind, Photovoltaik (PV) und Wasserkraft im Vergleich zur Energienachfrage.

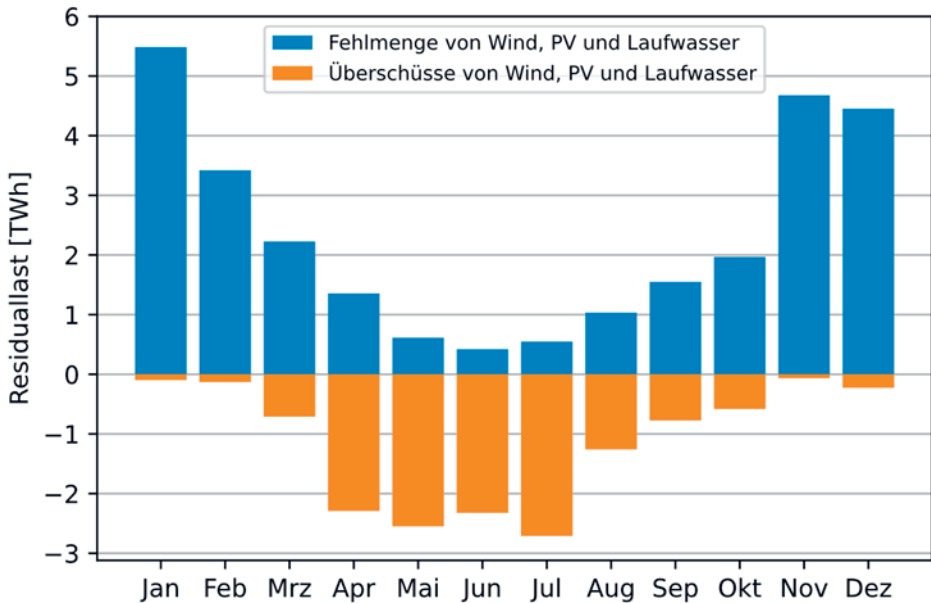


Abb. 1: Monatlich auftretende Überschüsse und Fehlmengen von Wind, PV und Laufwasser im Jahr 2050 (nach Huneke 2019)

Es gibt verschiedene Arten von saisonalen Speichersystemen, die derzeit verfügbar oder in Entwicklung sind. Eine davon ist die Verwendung von Wasserstoff. Bei der Erzeugung von überschüssiger Energie wird Wasserstoff aus Wasser und Elektrizität erzeugt und gelagert. Bei Bedarf kann der Wasserstoff dann in Brennstoffzellen zur Rückverstromung genutzt werden. Ein Vorteil dieser Technologie ist, dass der erzeugte Wasserstoff auch für andere Zwecke genutzt werden kann, wie z.B. für industrielle Prozesse. Eine andere Möglichkeit der saisonalen Speicherung ist die Nutzung von Wärme. In Zeiten mit hohem Energieangebot kann Wärme durch die Umwandlung von Strom erzeugt und in Wärmespeichern gespeichert werden. Wenn die Nachfrage nach Energie steigt, kann die gespeicherte Wärme genutzt werden, um den Wärmebedarf zu decken.

Ziel dieses Beitrags ist es, mithilfe von gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodellen bestehende saisonale Speichertechnologien und Betriebsstrategien für selbige auf ihre Eignung und Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchen. Die Ergebnisse der Optimierungen zeigen dabei das Verhalten der saisonalen Speicher in Zeitabständen zu jeweils einer Viertelstunde. Auf Basis dieser Ergebnisse kann eine realistische Abschätzung hinsichtlich der Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Speicher getroffen werden.

Die Inhalte dieses Papers sind wie folgt strukturiert: In Abschnitt 2 “Methoden” werden das Optimierungsmodell und die untersuchten Szenarien beschrieben. In Abschnitt 3 “Ergebnisse” werden die Ergebnisse der auf den Optimierungsmodellen basierenden Berechnungen beschrieben und grafisch dargestellt.

## 2 METHODEN

Um die Auswirkungen der saisonalen Speicherung auf das Energiesystem bewerten zu können, wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Die Szenarien werden als gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle abgebildet. Hierfür muss die Zeitachse diskretisiert werden. Jedes Szenario wird über den Zeit-

raum von einem Jahr berechnet, somit ergibt sich mit einem Zeitschritt von  $T = 0.25 \text{ h}$  eine Anzahl von 35040 Zeitschritten. Die Menge aller Zeitschritte bezeichnet  $I$  und  $i \in I$  bezeichnet einen einzelnen Zeitschritt.

## 2.1 POWER-TO-X TECHNOLOGIEN

Power-to-X (PtX)-Technologie ist ein Überbegriff für Systeme, welche den Stromsektor mit anderen Sektoren koppeln (u.a. Power-to-Gas). Im Bereich der saisonalen Speicher sind diese Kopplungen wichtig, um die elektrische Energie besser speicherbar zu machen. In Gleichung (1) wird die Produktionsrate des Speicherstoffs  $Q[i]$  in  $kW$  beschrieben.  $P_{elec}[i]$  bezeichnet die elektrische Leistung, welche für die Konversion benötigt wird, in  $kW$  und  $\eta$  beschreibt die Effizienz der Konversionstechnologie.

$$Q[i] = \eta \cdot P_{elec}[i] \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Des Weiteren soll die jeweilige Konversionstechnologie nur in einem gewissen Korridor elektrische Leistung aufnehmen können. Dies wird mittels Gleichung (2) modelliert, wobei  $P_{elec,min}$  die minimale elektrische Leistung des Systems und  $P_{elec,max}$  die maximale elektrische Leistung beschreibt. Die binäre Variable  $\sigma[i]$  stellt den Zustand des Systems („1“ = eingeschaltet, „0“ = ausgeschaltet) dar.

$$P_{elec,min} \cdot \sigma[i] \leq P_{el}[i] \leq P_{elec,max} \cdot \sigma[i] \quad i \in I \quad (2)$$

Da diese Konversionstechnologien auch eine gewisse Trägheit besitzen, werden zwei zusätzliche Nebenbedingungen benötigt, um dies abzubilden. In den Gleichungen (3) und (4) beschreibt der Parameter  $P_{elec,grad}$  die maximal veränderbare Leistung zwischen zwei Zeitschritten.

$$P_{elec}[i] - P_{elec}[i-1] \leq P_{elec,grad} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$P_{elec}[i-1] - P_{elec}[i] \leq P_{elec,grad} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

## 2.2 SPEICHER

In Gleichung (5) wird der Zusammenhang des State of Charge  $SOC$  zwischen zwei Zeitschritten beschrieben. Dabei ergibt sich der  $SOC$  im nächsten Zeitschritt  $i$  als der  $SOC$  aus dem vorherigen Zeitschritt  $i-1$ , gewichtet mit dem Speicherwirkungsgrad  $\eta_s$ . Der zweite Summand in Gleichung (5) ergibt sich durch die Ladeleistung  $SOC_c[i]$ , gewichtet mit dem Ladewirkungsgrad  $\eta_c$ , und die Entladeleistung  $SOC_d[i]$ , gewichtet mit dem reziproken Entladewirkungsgrad  $\eta_d$ . Der ganze Term wird zusätzlich mit dem Zeitschritt  $T$  multipliziert.

$$SOC[i] = \eta_s \cdot SOC[i-1] + T \cdot \left( \eta_c \cdot SOC_c[i] + \frac{1}{\eta_d} \cdot SOC_d[i] \right) \quad \forall i \in I \quad (5)$$

In Gleichung (6) erfolgt die Abbildung der Bedingung, dass die modellierte Speichertechnologie minimale Speicherstände  $SOC_{min}$  und maximale Speicherstände  $SOC_{max}$  benötigt.

$$SOC_{min} \leq SOC[i] \leq SOC_{max} \quad \forall i \in I \quad (6)$$

Mit den Gleichungen (7) und (8) wird sichergestellt, dass die Lade- und Entladeleistungen in den jeweiligen Korridoren bleiben. Hierbei beschreiben  $SOC_{c,min}$ ,  $SOC_{d,min}$  die minimalen Lade- und Entla-

deleistungen und  $SOC_{c,max}$ ,  $SOC_{d,max}$  die maximalen Lade- und Entladeleistungen. Die binären Variablen  $\sigma_c^{st}[i]$ ,  $\sigma_d^{st}[i]$  bilden ab, ob der Speicher beladen oder entladen wird.

$$SOC_{c,min} \cdot \sigma_c^{st}[i] \leq SOC_c[i] \leq SOC_{c,max} \cdot \sigma_c^{st}[i] \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$SOC_{d,min} \cdot \sigma_d^{st}[i] \leq SOC_d[i] \leq SOC_{d,max} \cdot \sigma_d^{st}[i] \quad \forall i \in I \quad (8)$$

Gleichung (9) trägt dafür Sorge, dass der Speicher in jedem Zeitschritt entweder nur geladen oder entladen werden kann.

$$\sigma_c^{st}[i] + \sigma_d^{st}[i] \leq 1 \quad (9)$$

### 2.3 X-TO-POWER-TECHNOLOGIEN

Die Rückumwandlung der eingespeicherten Stoffe in elektrische Energie wird mit einem ähnlichen Modell wie in Abschnitt 2.1 modelliert. Der Unterschied zum oben beschriebenen Modell liegt darin, dass Gleichung (1) durch Gleichung (10) ersetzt wird.

$$P_{elec}[i] = \eta \cdot Q[i] \quad \forall i \in I \quad (10)$$

### 2.4 SZENARIENDEFINITION

In den Szenarien wird die Einbettung von Speichersystemen in sogenannte Hybridparks untersucht. Um Hybridparks (Abb. 2) handelt es sich, wenn mehrere Erzeugungstechnologien (z.B. Windkraftanlagen, Photovoltaik, Elektrolyseure etc.) örtlich gebündelt werden. In allen Szenarien wird die Produktion durch einen 30 MW Windpark und einen 30 MW Photovoltaikpark (Abb. 3) sowie einen zusätzlichen 300 MWh Speicher repräsentiert. Des Weiteren wird eine auf 30 MW begrenzte Einspeiseleistung angenommen. In Szenario 1 wird der Hybridpark rein auf Basis der Day-Ahead-Preis-Optimierung betrieben. In Szenario 2 wird der Speicher so modelliert, dass die Randeffekte, wie das komplette Entladen des Speichers am Ende der Periode, in der Optimierung nicht auftreten. In Szenario 3 wird ein Mindestfüllstand im Herbst vorgegeben.

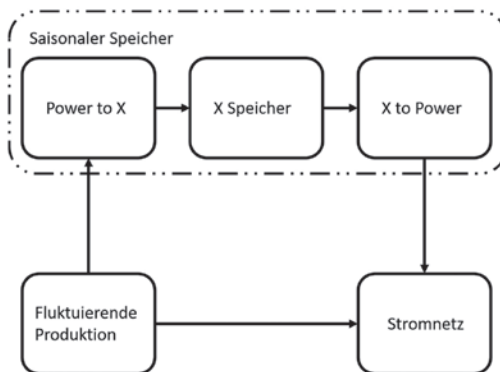


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Hybridparks

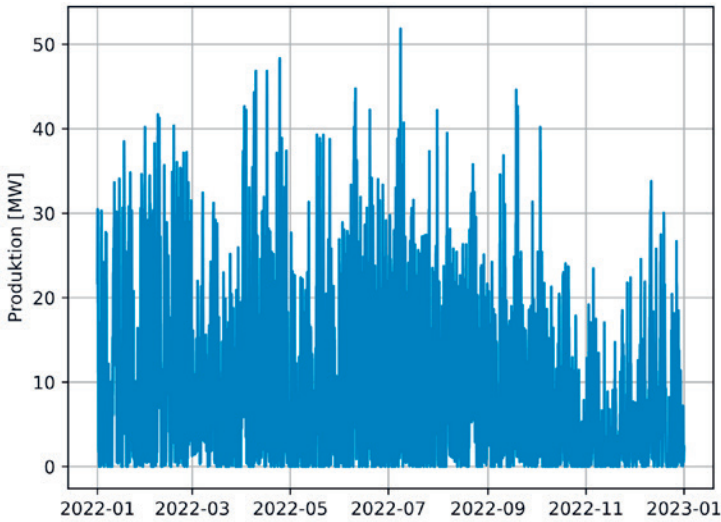


Abb. 3: Produktion des Hybridparks

### 3 ERGEBNISSE

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der preisoptimierten Beladung aus Szenario 1 zu sehen. In den Ergebnissen sind keine saisonalen Charakteristiken zu erkennen. Man kann feststellen, dass der Speicher mehrmals im Jahr zwischen Laden und Entladen wechselt. Am Ende des Berechnungszeitraums ist zu erkennen, dass der Speicher komplett entladen wird. Dieser Effekt tritt auf, da die Berechnung auf die Minimierung der Kosten abzielt. Aus diesem Grund wird am Ende der Optimierung der Speicher komplett geleert.

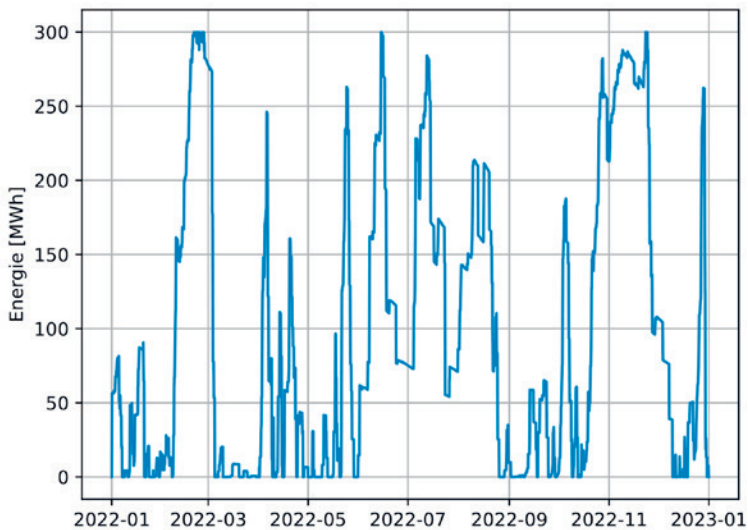


Abb. 4: Ergebnisse der preisoptimierten Beladung

Um den Effekt des Entladens am Ende des Berechnungszeitraums zu verhindern, wurde in Szenario 2 (Abb. 5) die Implementierung des Speichers so geändert, dass der 35040., also der letzte Zeitschritt mit dem 1. Zeitschritt gekoppelt wurde. Vergleicht man nun die Ergebnisse in Abb. 4 mit jenen in Abb. 5, erkennt man, dass kein großer Unterschied in den Ergebnissen auszumachen ist.

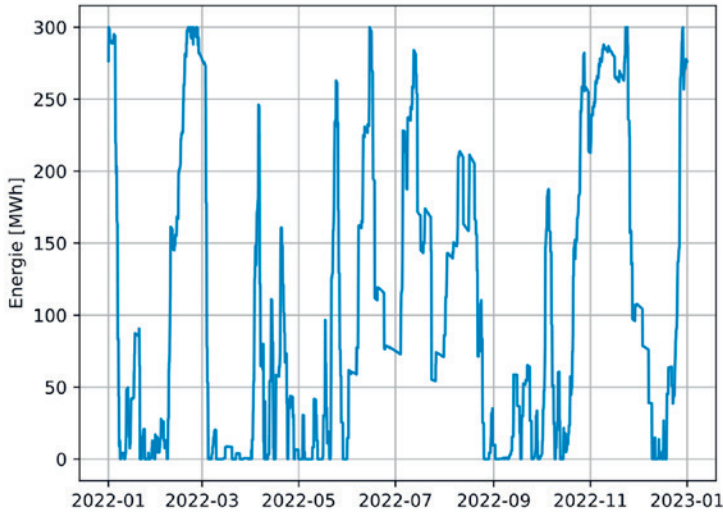


Abb. 5: Preisoptimierte Beladung inklusive der zyklischen Randbedingung

Im dritten Szenario wird eine zusätzliche Nebenbedingung eingeführt. Diese Nebenbedingung sorgt dafür, dass der Speicherinhalt zum 20000. Zeitschritt, also zu Beginn der Wintersaison, über 200 MWh sein muss. Auch dieser Mindestfüllstand führt nicht zu einer wesentlichen Veränderung in der Speicherbewirtschaftungsstrategie. In zeitlicher Nähe zu diesem Zeitschritt sind jedoch durchaus Veränderungen erkennbar. Je weiter die Entfernung von diesem Zeitschritt, desto ähnlicher sind die Ergebnisse der Optimierungen.

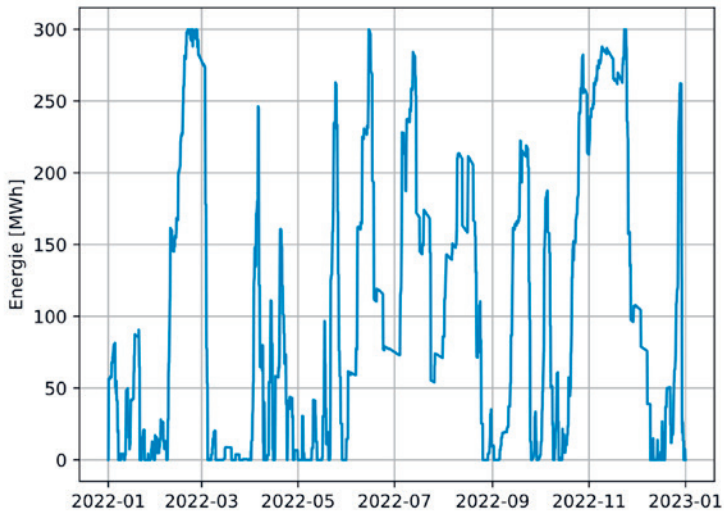


Abb. 6: Mindestbelastung von 200 MWh beim 20000. Zeitschritt

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im vorliegenden Artikel wird der Einsatz von Speichern in sogenannten Hybridparks im Hinblick auf saisonale Speichereffekte diskutiert. Die Anlage besteht hier aus einer 30 MW Photovoltaikanlage, einem 30 MW Windpark und einem zusätzlichen 300 MWh Speicher. Zusätzlich besteht am Netzzugangspunkt eine Engpassleistung von 30 MW. Der Betrieb der Speicher erfolgt in einer preisoptimierten Betriebsweise, welche die Erlöse auf Basis des Day-Ahead-Preises maximiert. Dabei zeigt sich, dass die reine Day-Ahead-Optimierung alleine keine saisonale Charakteristik im Speicherstand auslöst - auch nicht beim Festlegen einer Mindestbelastung zu Beginn der Wintersaison. Basierend auf diesem Erkenntnis werden bei der e-nova weitere Strategien zur Be- und Entladestrategie vorgestellt, die eine saisonale Charakteristik abbilden sollen.

#### LITERATUR

Huneke F., Perez Linkenheil C., & Heidinger P. (2019). *Österreichs Weg Richtung 100 % Erneuerbare - Eine Analyse von 2030 mit Ausblick 2050*. Berlin: Energy Brainpool.

Kontakt:

Markus Schindler

Forschung Burgenland GmbH

Campus 1

A-7000 Eisenstadt, Österreich

+43 5 7705-5487

markus.schindler@forschung-burgenland.at



# Control-oriented test bed for mobile air conditioning systems

M. Lössch, M. Fallmann, M. Kozek  
*TU Wien, Vienna, Austria*

**ABSTRACT:** Model-based control schemes demand experimental investigations to derive a suitable model for control, tune the controller settings, and evaluate the controller performance. Especially with the increased usage of secondary loop refrigeration units, which allow for much more flexible control of the cooling operation, the urge to test sophisticated control schemes on hardware has risen drastically. Since experimental investigations of mobile refrigeration units during development are costly and sometimes not feasible due to incomplete hardware, this work presents a test bed for mobile refrigeration systems, particularly for evaluating controllers. The test bed stands out due to its simple, low-cost construction and the absence of environmentally harmful coolants. The test bed comprises multiple cooling units and a cooling chamber, enabling low-cost experiments for high-level temperature controllers. With a electric heater and a door spanning one side of the cooling chamber, it is possible to investigate the influence of door openings and other disturbance heat flows on the controller performance.

## 1 INTRODUCTION

The environmental damage caused by HFC refrigerants has led to increased research into more environmentally friendly refrigerants for mobile air conditioning systems. Propane (R290) as a coolant promises to be a viable alternative for this purpose and is already being used successfully in the industry (PBX 2023). However, due to the flammability of propane and the resulting safety hazards, additional measures are necessary to use this coolant for mobile refrigeration systems. One way to overcome this issue is to separate the coolant from the inside of the cooling chamber by a secondary cooling loop (Wang et al. 2009). Furthermore, such architectures offer the possibility of using the additional loop as a thermal energy storage. Due to the additional flexibility provided by the thermal storage in the operation strategy of the refrigeration unit, sophisticated model-based control schemes promise significantly lower energy consumption compared with conventional controllers (Shafiei & Alleyne 2015; Lössch 2022). Nevertheless, the implementation of such controllers in the industry is restrained by limited time, availability, and the high cost of experimental investigations on actual vehicles. However, numerous experiments are required to derive suitable models for control, tune the controller settings, and evaluate controller performance during the development of model-based controllers. Therefore, this work presents a test bed for supporting the development of high-level control schemes for mobile air conditioning systems.

In the following, the layout of the test bed and its analogy to a cooling system with a secondary loop is described in detail. Next, experimental measurements of the test rig are shown and discussed. Finally, the paper concludes with a summary and an outlook on the possible use cases of the test bench.

## 2 TEST BENCH DESCRIPTION

Fig. 1 shows a refrigerated vehicle equipped with a secondary loop cooling unit.

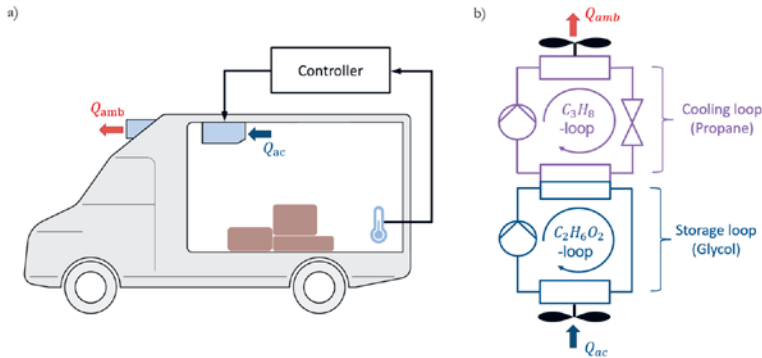


Fig. 1: Scheme of (a) a refrigerated vehicle with (b) a secondary loop refrigeration unit

The cooling unit under consideration has a cooling loop using propane as refrigerant and a storage loop filled with a water-glycol mixture. The cooling loop is a conventional vapor compression refrigeration cycle with a condenser, evaporator, compressor, and expansion valve. A pump moves the glycol through the storage loop, and the two loops exchange a heat flow via a heat exchanger on the evaporator side of the cooling loop. Fans attached to the condenser of the cooling loop and a heat exchanger connected to the storage loop increase the heat exchange with the environment  $Q_{amb}$  and the cooling chamber  $Q_{ac}$ , respectively.

The temperature of the cooling chamber is controlled by a high-level controller, calculating the required heat flow of the cooling unit  $Q_{ac}$ . Note that the scope of this work and the test bench presented do not consider the low-level controllers of the individual components of the secondary loop cooling unit, such as control of the evaporator superheat.

The presented test bench is intended to replicate the dynamics of this configuration, referred to below as the original configuration, to experimentally test high-level temperature controllers for such vehicles and refrigeration units. For pictures of the test bed, see Fig. 2.

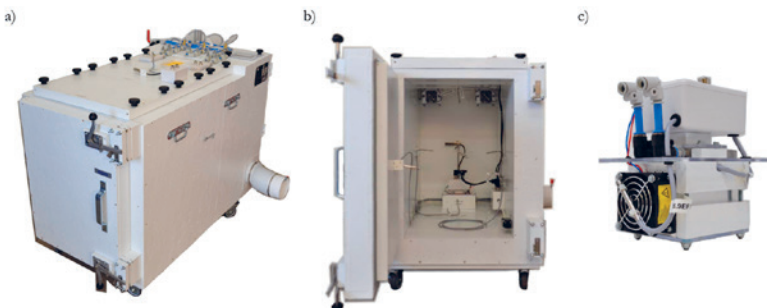


Fig. 2: Test bed in (a) outside and (b) inside view, and detailed view of (c) a cooling unit

### 2.1 COOLING UNIT

The cooling units used in this test bed are thermoelectric coolers. These are based on the Peltier effect and have the advantage of having no liquids or moving parts compared to the cooling unit of the original configuration, which both saves costs and extends the lifetime of the test bed. Since only higher-

level temperature controllers are to be tested and lower-level controls of the individual cooling components are irrelevant for the test bench, this simplification is justifiable. The test bed can be equipped with up to three cooling units. An illustration of an individual cooling unit with important measurement and control variables is given in Fig. 3.

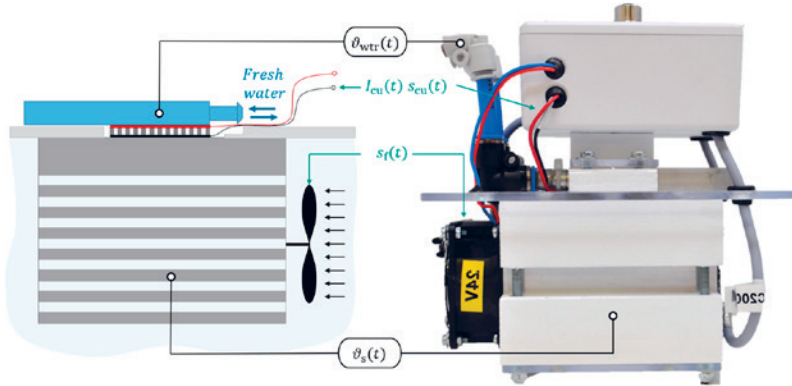


Fig. 3: Illustration of one of the test bed's cooling units

A heat sink is mounted on each side of the thermoelectric cooler. On the side of the cooler where the excess heat is dissipated, a water cooling block is installed, which is fed with fresh water with temperature  $\theta_{wtr}$ . On the other side of the cooler, a large air-cooled heat sink is installed with the temperature  $\theta_s$ . This heat sink emulates the storage loop of the original configuration, as it can also store thermal energy before it is transported to the inside of the cooling chamber. A fan mounted to this heat sink can evoke a heat flow by natural or forced convection to the air inside the cooling chamber. The status (on/off) of the fan  $s_f$  can be freely selected for temperature control. Another variable for control is the current through the thermoelectric cooler  $I_{cu}$ , corresponding to the heat flow  $Q_{ac}$  of the original configuration. Further, the control schemes to be tested can turn the cooling unit on or off by the variable  $s_{cu}$ .

## 2.2 COOLING CHAMBER

The cooling units are mounted to the roof of the cooling chamber, see Fig. 4.

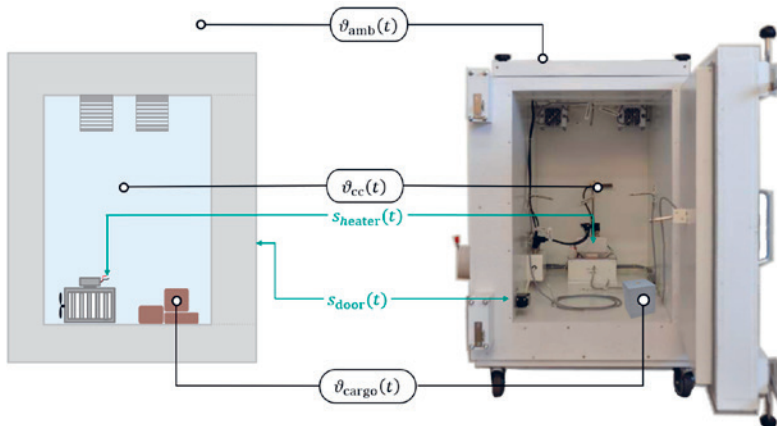


Fig. 4: Illustration of the test bed's cooling chamber

Insulated walls surround the cooling chamber, and one side of the chamber can be opened by a door. Door openings are detected by a sensor and indicated by the variable  $s_{\text{door}}$ . A heater is installed in the cooling chamber, which generates a disturbance heat flow when active,  $s_{\text{heater}}$ . This disturbance heat flow can later be used to test control schemes for disturbance rejection. Several sensors are installed within the chamber to measure the air temperature  $\vartheta_{\text{cc}}$  of the cooling chamber. Optionally, cargo can be placed in the chamber. Its temperature can be measured, indicated by the variable  $\vartheta_{\text{cargo}}$ . These measurements make it possible to develop control schemes that regulate not only the temperature of the air inside the chamber but also the temperature of the cargo directly.

### 3 EXPERIMENTAL INVESTIGATION

This chapter describes experimental open-loop tests in which the controlled variables are set manually. In Fig. 5, a short experiment with a duration of 40 min is shown.

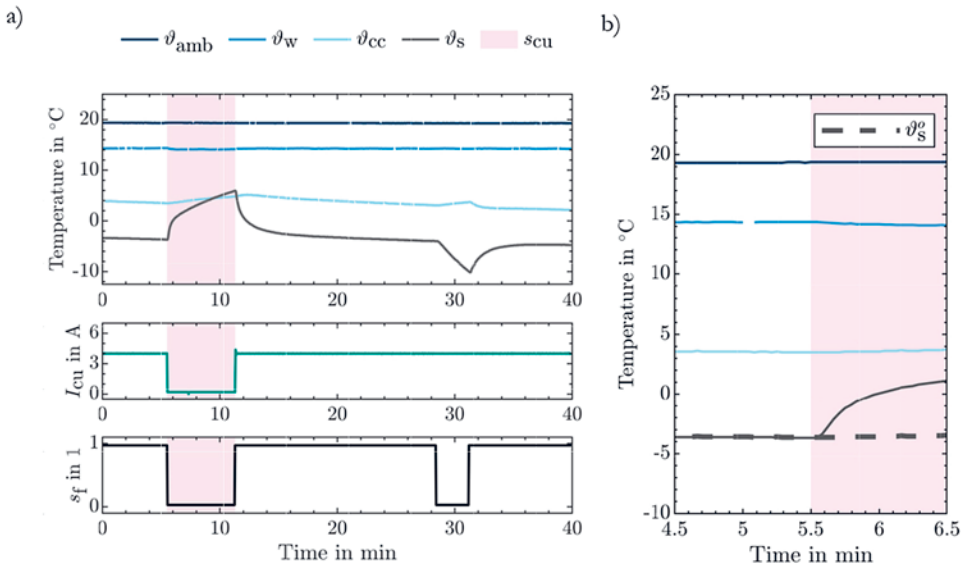


Fig. 5: Experimental results and comparison to dynamics of the original configuration. The complete experiment is shown in (a), and a detailed view of the deviations from the test bed to the original configuration is given in (b).

During the entire experiment, the door is closed, and the heater is switched off. In the interval highlighted in red, when the cooling unit is switched off, the temperature of the heat sink  $\vartheta_{\text{s}}$  rises very quickly. These dynamics are due to the thin dimensions of the thermoelectric cooler. Therefore, there are high heat losses through the cooler to the water block by thermal conduction. When the cooling unit is active, these losses can be interpreted as operating losses, but when the cooling unit is off, these losses are undesirable and do not correspond to those of the original configuration. The heat conduction losses of the original system, when the cooling unit is switched off, are significantly lower, meaning that it can store thermal energy for much longer periods compared to the test bed. To obtain the same storage capabilities as the original configuration, an impedance controller compensates for conductive heat losses when the test bed's cooling units are switched off by inducing a current through the thermoelectric cooler,  $I_{\text{imp}}$ . This subordinate controller automatically becomes active when the cooling unit is

switched off ( $s_{cu}=0$ ), thus emulating the behavior of the original cooling unit with a secondary loop. The details of this impedance controller are described elaborately by Fallmann et al. (2023).

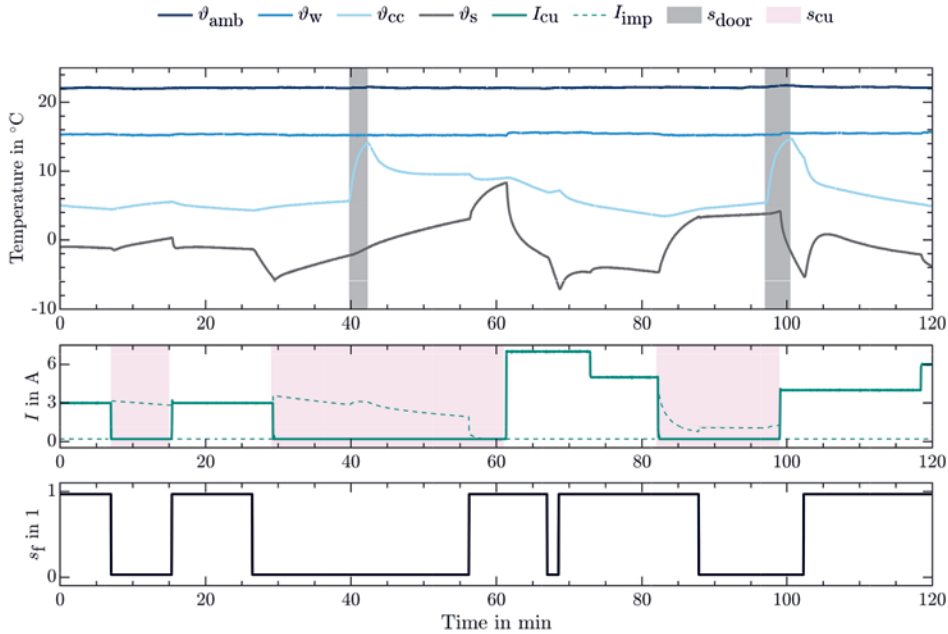


Fig. 6: Experimental result of test bed with active impedance controller

Fig. 6 shows experimental results with the impedance controller in action. When the cooling unit is turned off, the impedance controller becomes active and compensates for the conductive heat losses through the thermoelectric cooler. During this experiment, the door of the cooling chamber is opened two times (highlighted by gray background shading), resulting in a rapid increase of the cooling chamber temperature. In this experiment, the control variables of the current through the cooling unit  $I_{cu}$ , cooling unit status  $s_{cu}$  and the fan status  $s_f$  are prescribed manually. In the future, to evaluate high-level temperature controllers, the control schemes can set these variables to test their performance regarding, for example, setpoint tracking or disturbance rejection.

## 4 SUMMARY AND OUTLOOK

This work presents a test bed for evaluating high-level temperature controllers of mobile air conditioning systems. The test bench enables a comprehensive evaluation and comparison of controllers, which significantly supports the development of sophisticated control schemes. Especially for model-based optimal control schemes, such a test bed is essential to develop them cost-efficiently. Such controllers allow for flexible adjustment of the control targets, such as minimum energy consumption or strictly obeying temperature requirements. Therefore, this test bed can reduce the refrigeration industry's environmental burden by simplifying the development of new control schemes, which are currently hampered by unavailable or costly test equipment.

This test bed is also suitable for the development and testing of decentralized control schemes, as up to three cooling units can be installed inside the cooling chamber. Decentralized control has the advantage over centralized controllers that they generally require less computing power and can be

used on less powerful computing units. Further, they are also operational if one cooling or computing unit fails.

Model-based control techniques also offer the possibility of incorporating predictions of future disturbance into the control law, which can significantly improve the performance of the control schemes. A control scheme that includes forecasts of future door openings in calculating the control variables has already been tested (Lösch 2023). These tests have shown that significant energy savings are possible by incorporating predictions of future disturbances into the control law compared with conventional controllers. Further research on similar control schemes will be investigated on this test bench.

Conventional controllers of mobile air conditioning systems typically regulate the air temperature of the cooling chamber, but direct control of the cargo temperature would be more reasonable. Due to the possibility of placing cargo inside the cooling chamber and measuring its temperature, such controllers can also be developed with this test bed.

Further, it can be utilized to develop high-level temperature controllers for other cooling applications, such as air conditioning systems for buildings or household refrigerators.

## LITERATURE

- Fallmann M., Kölbl J., Ausweger T., Lösch M., Poks A., and Kozek M.. (2023) Test Bed Emulation of Secondary Loop Refrigeration Units Using Peltier Elements: An Impedance Control Approach, 22nd IFAC World Congress
- Lösch M. (2022) Design, implementation, and experimental validation of model predictive control scheme for a small-scale refrigerated truck, Master's thesis, Technische Universität Wien.
- PBX GmbH. (2023) <https://pbx.at/de/products/>, Product information: ecos M24, Accessed: 2023-03-28.
- Shafiei S. E., Alleyne A. (2015) Model predictive control of hybrid thermal energy systems in transport refrigeration, *Applied Thermal Engineering* 82 264–280.
- Wang K., Eisele M., Hwang Y., Radermacher R. (2010) Review of secondary loop refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration* 33 (2) 212–234.

Contact:

Maximilian Lösch

TU Wien

Getreidemarkt 9/E325

1060 Wien, Austria

Tel. +43 (1) 58801 325-543

[maximilian.loesch@tuwien.ac.at](mailto:maximilian.loesch@tuwien.ac.at)

# An international policy-oriented workstream for energy efficiency of Data centres

A. Díaz Triana

ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH, 1040 Wien, Austria.

**ABSTRACT:** Data centres (DC) are crucial infrastructure of an ever more digitalized world. The increasing demand of digital services for smart energy systems, automated production systems, autonomous transport, blockchain and artificial intelligence will have implications on the size, numbers and energy demand of data centers globally. Energy consumption of DCs is estimated to account for 1% to 1,5% of the worldwide electricity use (IEA 2022). This paper presents and discusses a new international policy-oriented Workstream focusing on energy efficiency for data centres. Its objectives are evaluating the different aspects of energy efficiency, developing harmonized efficiency metrics and policies to promote better monitoring, reporting, and management of energy use of the data centres.

## 1 INTRODUCTION

Data centres and wide area networks are complex systems connecting computers and other devices together on the internet. In particular, a data centre has one or various structures to accommodate, interconnect and operate information technology (IT) and network telecommunications equipment in a centralized way, which in turn provide data storage, processing and transport services (OVE 2022). The DC infrastructure also includes the building envelope, power and environmental controls which securely house the equipment, provide a reliable power supply and ensure a suitable operating environment, as shown in Fig. 1. The energy consumption of a DC is determined by the energy use of the IT hardware and supporting infrastructure, but also by how the equipment interacts and is being controlled (Wu et al. 2019).

Although the demand of digital services provided by DCs is rapidly increasing, the energy efficiency improvements, the purchase and use of renewable energy, and the broader decarbonization of electricity grids in many regions have helped maintain a moderate electricity consumption of DCs, accounting for around 1% to 1,5% of global electricity use (Kamiya 2021; IEA 2022). Different scenarios of global electricity use by DCs are discussed in Masanet et al. (2020) and show differences in the forecasted energy use up to 2030.

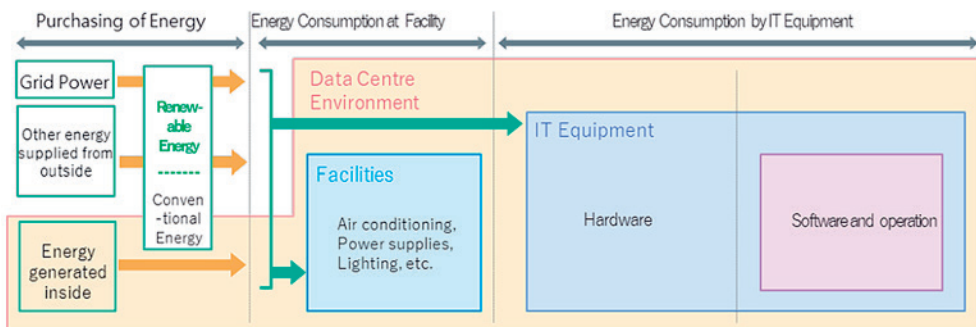


Fig. 1: Scheme of the data centre environment, including energy inputs (Wu et al. 2019).

In the case of Austria there is limited information on the energy use of DCs. A project of the Austrian Energy Agency presents the impacts of digitalization in various sectors (AEA 2022). The analysis shows estimates of energy consumption of the information and communication technology (ICT), on the basis of another study on DCs (carried out in Germany by Fraunhofer IZM in 2015), with trends extrapolated until 2040 for Austria. In the reference scenario, the final energy consumption is around 292 TWh; and around 4% to 10% of energy consumption could be saved in 2040 through digitization. However, the authors indicate that the increased use of ICT, data centers and telecommunications infrastructure can result in up to 2,3 TWh of additional energy consumption (Baumann et al. 2022a; Baumann et al. 2022b). Recent studies in neighboring countries also suggest that the data volume processed and stored in DCs will continue to increase. The electricity consumption of DCs and server rooms in Switzerland for 2019 accounted for between 3,3% and 4,1% of the total electricity consumption (Jakob et al. 2021). In Germany, the energy demand of servers and DCs increased by 7% year-on-year, equivalent to around 1 billion kilowatt hours (kWh) to 16 billion kWh in 2020 (DB, 2021). At European level the electricity consumed by DCs was estimated at 2,25% of the total EU electricity use in 2015, and this amount is expected to double by 2030 (Dodd et al. 2020).

To reach 2030 and 2050 greenhouse gas emission reduction targets, policy-makers are exploring suitable policies and approaches to increase the energy efficiency of DCs. This paper describes the activities of the Workstream energy efficiency of data centres of the Electronic Devices and Network Annex - EDNA (EDNA 2022). The goal of this international collaboration is to assist policy-makers in creating and improving energy efficiency policies tailored specifically to DCs, by carrying out specific activities, as presented in Fig. 2. Various activities under “Current status” are explained in the next sections. Other activities under “measures” and “impact/projections” will continue in 2023 and 2024, to include energy efficiency metrics and possible policies in EDNA’s Total Energy Model (Ryan et al. 2019; Díaz 2020, EDNA 2020).

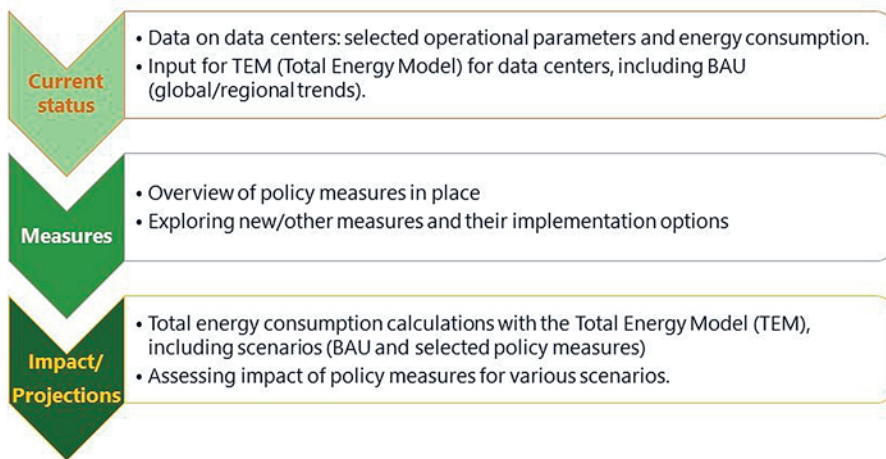


Fig. 2: Phases and activities of the Workstream on energy efficiency of DCs (EDNA 2022).

## 2 DEFINITION, CLASSIFICATION AND ENERGY USE TRENDS.

The activities under “Current status” explore the diverse definitions and classifications of DCs. This analysis also evaluates the energy use trends, and the data availability and quality of metrics and in-

formation. For policy-makers it is necessary to consider a suitable scope, boundaries, components and the relevant energy and material flows in a DC, when developing policy measures on energy efficiency. The definition proposed in this Workstream is: “A data centre is a structure, or group of structures, dedicated to the centralized accommodation, interconnection and operation of, *and including*, information technology (IT) and network telecommunications equipment providing data storage, processing and transport services together with all the facilities and infrastructures for power distribution and environmental control together with the necessary levels of resilience and security required to provide the desired service availability” (Harryvan 2023).

There are different classifications of DCs, according to the DC purpose, security level, physical size, accommodation, availability of service, provision of security, and objectives for energy efficiency. The most common aspects used by the industry to classify DCs are purpose, availability of service, and size. A suitable classification of DCs for policy-making purposes shall cover (most of) the entire market, and include sufficiently specific categories of DCs so that policies are effective. The classification developed in the Workstream, shown in Tab. 1, reflects the ownership and operation of the DC - building infrastructure, hardware and software (Harryvan 2023). It starts with the dedicated enterprise DCs, which are operated with the sole purpose of delivering and managing services for employees and customers. The co-hosting DCs follows. In this case, multiple co-hosting customers operate their own software and services through access to the network(s), servers, and storage equipment. Finally, in the co-location DCs the supporting infrastructure is provided as a service by the co-location provider, and the DC hosts the network(s), servers and storage equipment of many customers.

Tab. 1: Classification of DCs for the EDNA Workstream (adapted from Harryvan 2023).

Responsible party for ownership/operation			
DC Category	Building supporting infrastructure	IT equipment	Software
Enterprise	Data centre owner		
Co-hosting	Co-hosting provider		Co-hosting customers
Co-location	Co-location provider	Co-location customers	

Trends of energy use of DCs were already discussed, from Masanet et al. (2020), Kamiya (2021), and IEA (2022); and will continue to be tracked due to the awareness that digitalization is driving the growth of DC services. Tab. 2 shows the energy use for the four major elements inside a data centre (IEA 2022). The energy use of the DC site infrastructure is mainly due to the energy demand for the cooling solution, and this cooling is needed to dissipate the heat losses of the IT equipment in order to maintain an appropriate range of operation of sensitive equipment.

Tab. 2: Energy use of DC elements (adapted from Harryvan, 2023).

Elements inside DC	Estimated energy use 2021 (TWh)
DC site infrastructure	59,0
Servers	109,0
Storage	19,0
Network	4,0

Harryvan (2023) indicates that the servers are responsible for over 80% of the total energy use of a DC, and their utilization and efficiency are very important for the overall energy efficiency of the DC. In the short-term IT systems will continue improving in capacity and efficiency, but these improvements will come at a slower rate compared with previous decades. The newer systems will most likely have higher energy demands, creating even more heat in a smaller space than current systems, and demanding an effective cooling; but more options could also emerge for using the waste heat, because e.g., liquid cooling delivers waste heat with a higher temperature.

### 3 METRICS FOR DATA CENTRE ENERGY EFFICIENCY

Industry specialists have developed different metrics to optimize operations and costs of data centres considering aspects related to the design and operations, such as building construction, power distribution, environmental control, telecommunications cabling and physical security. Metrics like the power usage effectiveness (PUE), IT equipment energy efficiency for servers (ITEEsv), and IT equipment utilization for servers (ITEUsv) are available and defined in the standard series ISO/IEC 30134 Information technology - Data centres - Key performance indicators (Parts 1 to 9). The power usage effectiveness (PUE) is the most common metric used for reporting and benchmarking the energy performance of DCs, and it is often also used for marketing. The PUE is a ratio which divides the total amount of power entering a data center facility by the power used by the IT equipment. PUE only expresses the overhead energy consumption for auxiliaries, compared to the IT consumption. PUE values towards 1.0 show better management of the whole DC infrastructure, but do not give insights into the performance of the IT equipment. Worldwide PUE improvements are slowing down for large DCs since 2014, and seems to be stalling at around 1,55 in 2022 (Uptime Institute 2022).

The EDNA Workstream experts analyzed and evaluated a number of DC metrics from standards such as CEN, CENELEC and ETSI in Europe, and IEC/ISO internationally, as well as metrics from DC associations and companies, and from regulatory programs in various (EDNA) countries. Two types of metrics - energy and functional, were identified and described in a comprehensive study (Viegand Maagøe 2022). The energy metrics provide information about how energy is consumed by specific equipment and systems, without considering the output or work delivered by the equipment/system or by the complete DC. The functional metrics consider the data processing, storage and transport (networking) services delivered by the DC. On the one hand, metrics for evaluating the performance of single IT equipment in data centres are already incorporated in European regulation, for example for enterprise servers and data storage products (OJEU, 2019). The measurement of the server efficiency in this regulation follows the standard EN 303 470: 2018-Environmental Engineering (EE); Energy Efficiency measurement methodology and metrics for servers. On the other hand, only two cases of single metrics for all the DC functions - the data centre performance per energy, from the Japanese Green IT Promotion Council; and the ICT capacity and utilization, from the Green Grid were identified. *Two new DC functional metrics* for use by policy-makers were proposed by the Workstream (Viegand Maagøe 2022). The first one is the IT equipment average efficiency index (ITAEI), defined as the average used capacity divided by the average IT power used. The second metric is the data centre functional efficiency (DCFE), which evaluates the total work delivered and the total energy consumption of the DC during a reporting period. This metric focuses on the DC operation and all the energy consumed. These two proposed metrics require data on the used capacities and used power of servers, storage and network; and the work delivered by servers, cumulative storage and network used along a reporting period.

*Two alternative DC energy metrics* to assess energy wasted in servers and DCs were also defined by the EDNA Workstream. These are the server idle coefficient (SIC) and the data centre idle coefficient (DCIC). The SIC only targets servers and quantifies the percentage of energy spent on idle cycles. Idle is the process when the server has no useful workload to run. The DCIC extends the SIC to all the servers in the data centre, and it is a percentage of the energy use of the IT equipment that is used for idle in the DC. The DCIC addresses the operation of the IT equipment by owners as well as the design of the

equipment by manufacturers. Harryvan (2021) provided examples on the data needed from the server hardware platform to calculate the SIC, particularly data on CPU utilization and total power draw over regular intervals. This study analyzed the SIC and DCIC metrics for real server cases, and discussed optimization examples, such as the selection of equipment with low idle power draw and optimization of workloads.

## **4 POLICIES FOR ENERGY EFFICIENCY OF DATA CENTRES**

Experts of the Workstream recognize that the DC is a complex system, with many and different (infrastructure and IT) sub-systems and components, where also the assembly plays a role on the energy performance of the system(s). The possible policy measures for regulating systems need to consider the scope, the addressees of the regulation, the energy efficiency metric(s) and requirements, and the performance assessment methods including testing or other alternatives. The development of regulations needs to go hand in hand with appropriate approaches for verification and enforcement (IEA 4E 2022). Brocklehurst (2021) completed a global overview on data centres. For data centres as a complete operational unit, direct energy efficiency regulations were lacking. Voluntary labels, rating and certification schemes for DCs, some of which include energy efficiency as a criterion, have been developed by different organizations. Other initiatives such as public sector procurement criteria, are also in place. Prior to the development of any policy option for DCs, data collection is an important and necessary step. Therefore, policy-makers need to consider a harmonized framework for the provision of information, which will enable access to the data for statistical and technical analysis of DC. This also means defining the parameters, the testing methods, sampling periods and/or the reporting periods for data collection for the different DC categories (Viegand Maagøe 2022). Attention shall be paid, for example, to co-location data centres, because the co-location providers may be able to set some requirements regarding IT hardware, but they may not know the energy efficiency and operational conditions of the hardware in the DC. Moreover, the co-location customers may not want the provider know to energy efficiency related information (Harryvan 2023). With such situations in mind, the proposal for the new EU Energy Efficiency Directive is a positive step, since it will probably be the first regulation to be implemented that requires DC owners and operators to publish data, which can in turn be used for evaluating metrics (Viegand Maagøe 2022).

## **5 SUMMARY AND OUTLOOK**

The forecast for energy use by data centres is greatly dependent on the modeling scenarios, with a strong interplay between the impact of growth in energy demand and the efficiency gains. Future trends with impacts on energy use are the shifting of computing capacity, e.g., from enterprise to co-location DCs, the faster adoption of more efficient IT equipment (and also new technologies for cooling); deploying IT equipment and resilience levels for specific business cases, targeting the right utilization levels of the servers, networking and storage. Still, scenarios where energy use by DCs will continue to rise are more likely in the near future. This is why policy-makers started the international Workstream to promote energy efficiency policies for data centres (EDNA 2022). Suitable metrics for energy efficiency of DCs need to consider the scope (DC buildings, ICT equipment, power supply, cooling equipment, and integrated power and emergency generation equipment), as well as the role that strategies such as the use of waste heat and renewable energy can play in terms of energy efficiency, in addition to reducing greenhouse gas emissions, and enabling synergies with the infrastructure around the location of the DC. The metrics and policies need to be applicable to existing and future DC, and the lack of data on DCs shall not hamper policy development, but shall help identify the technical, confidentiality, organizational or other issues that limit data availability. This EDNA Workstream has defined new energy and functional metrics (4), which could serve for developing policy measures. The work will continue

in 2023, to quantitatively model policy scenarios and their impacts, with selected metrics and by means of an expanded Total Energy Model (EDNA 2020).

## ACKNOWLEDGEMENT:

This work is supported by the IEA Research Cooperation program of the Austrian Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology (BMK), under the FFG Grant 890457.

## LITERATURE

- OVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik (2022). OVE CLC TR 50600-99-1. Edition: 01.01.2022.
- AEA - Austrian Energy Agency (2022). DigAT-2040 - Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich.
- Baumann M., Egger L., Pauritsch G., & Rohrer M. (2022a). Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich. D3.1- Kurzpapier Szenarien. Austrian Energy Agency, Wien.
- Baumann M., Egger L., Pauritsch G., & Rohrer M. (2022b). Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich. D4.1-Quantifizierung der Szenarien. Austrian Energy Agency, Wien.
- Brocklehurst F. (2021). International Review of Energy Efficiency in Data Centres for the Australian Department of Industry, Science, Energy and Resources. Ballarat Consulting.
- DB - Deutscher Bundestag (2021). Sachstand Energieverbrauch von Rechenzentren. WD 8 - 3000 - 070/21. Fachbereich WD 8.
- Díaz A. (2020). The Total Energy Model for Connected Devices. Proceedings of the e.nova International Congress 2020. Fachhochschule Burgenland GmbH. Pinkafeld, Austria. Band 24, 297-303.
- Dodd, N., Alfieri, F., Maya-Drysdale, L., Viegand, J., Flucker, S., Tozer, R., Whitehead, B., Wu, A. & Brocklehurst F. (2020). Development of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services. Report EUR 30251 EN, Pub. Off. of the EU, Luxembourg. doi:10.2760/964841.
- EDNA - Electronic Devices and Networks Annex (2020). EDNA Total Energy Model.
- EDNA - Electronic Devices and Networks Annex (2022). Task 28 - Data Centres Workstream Activity #1 – Scope, Trends and Data Availability.
- Harryvan D.H. (2023). Policies for Data Centre Energy Efficiency: Scope, Trends and Availability of Data. Report Prepared for IEA - 4E EDNA.
- Harryvan D.H. (2021). The Idle Coefficients - KPIs to assess energy wasted in servers and data centres. Report Prepared for IEA - 4E EDNA.
- IEA (2022). Data Centres and Data Transmission Networks. International Energy Agency, Paris, France. License: CC BY 4.0.
- IEA 4E (2022). Progressing energy efficiency policy for systems. International Energy Agency, Energy Efficient End-use Equipment TCP (IEA 4E).
- Jakob M., Müller J. & Altenburger A. (2021). Rechenzentren in der Schweiz – Stromverbrauch und Effizienzpotential. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie. Bern, Switzerland.
- Kamiya G. (2021). Total Energy Model for Connected Devices. Webinar series, 28.04.2021. International Energy Agency. Paris, France.
- Masanet, E., Shehabi A., Lei N., Smith S. & Koomey J. (2020). Recalibrating Global Data Center Energy-Use Estimates. *Science* 367, No. 6481 (2020): 984-986.
- OJEU - Official Journal of the European Union (2019). Commission Regulation (EU) 2019/424. Document 32019R0424.

- Ryan P., Smith T., & Wu A. (2019). Total Energy Model for Connected Devices. Report Prepared for IEA - 4E EDNA.
- Uptime Institute (2022). Global Data Center Survey 2022. New York, USA.
- Viegand Maagøe (2022). Viegand Maagøe Consultants. Energy Efficiency Metrics for Data Centres. Report prepared for IEA - 4E EDNA.
- Wu A., Ryan P., Smith T., & Wong H. (2019). Intelligent efficiency for data centres and wide area networks. Report prepared for IEA - 4E EDNA.

Contact:

Dr. Adriana Díaz Triana

ECODESIGN company engineering & management consultancy GmbH.

Schwindgasse 4/2

A-1040 Wien, Austria

+43 1 40 35 611 33

diaz@ecodesign-company.com; www.ecodesign-company.com



# Poster

## **Building a laboratory for simultaneous testing of radiant floor, ceiling and wall systems**

Šimko, Petráš, Szabó, Krajčík / TU Bratislava / SK

## **Is the air in primary schools as bad as we think?**

Štefanič / TU Bratislava / SK



# Building a laboratory for simultaneous testing of radiant floor, ceiling and wall systems

M. Šimko, D. Petráš, D. Szabó, M. Krajčík  
*Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering*

**ABSTRACT:** We live in a time when climate change is increasingly forcing us to deal with the question of the right choice of heating or cooling system for living spaces. An option for both heating and cooling design is the use of water-based radiant systems. Radiant systems are particularly suitable for combination with renewable sources, provide high sensible output, and can be used for both heating and cooling. The aim of this study is to describe the construction of a measuring stand and the process of preparation for experimental measurements of the floor, ceiling, and wall radiant system. The laboratory is part of an office building owned by the Faculty of Civil Engineering at STU in Bratislava. The heat/cooling source is an air-to-water heat pump located on the roof of the building. The purpose of the measurements is mainly to compare the operation of three radiant systems in three rooms with the same boundary conditions in both cooling and heating mode.

## 1 INTRODUCTION

We live in a time when climate change is increasingly forcing us to deal with the question of the right choice of heating or cooling system for living spaces. Due to global warming, we are experiencing milder winter seasons and then, without the pleasant transitional period of spring, we suddenly find ourselves in hot summer days. Therefore, the question of how to cool buildings during hot summer days comes forward. There are different types of heating or cooling systems. One option for both heating and cooling design is the use of water-based radiant systems. Radiant systems are particularly suitable for combination with renewable sources, provide high sensible output, and can also be used for heating and cooling (Babiak et al. 2013; Krajčík et al. 2021a; Krajčík et al. 2021b).

**Water-based ceiling heating** works on the principle of heating water in a tubular grid to the start-up temperature and warming the ceiling in several minutes. This creates a layer of warm air about 20 centimetres underneath, which does not sink and does not allow cooler air to reach the ceiling. With ceiling heating, the heat radiates from above. Walls, objects, people, animals, and air are gradually heated. If the system is properly sized and set up, it responds to the control stimulus relatively quickly. The benefits of ceiling heating are invisibility, health safety, and negligible to zero maintenance requirements. A larger area should logically have a higher output. **Water-based ceiling cooling** is by many considered to be more comfortable for humans compared to floor or wall cooling. The water in the system naturally cools the ceiling first, and from there the cooler air gradually drops into the room. It is important that the system is temperature-controlled so that the inlet and outlet water temperature do not exceed the limit values (Krajčík et al. 2021a).

**Floor heating** is used more frequently than ceiling heating. In terms of comfort, floor heating gives the feeling of warm feet. The advantage of floor heating is also the even distribution of radiant heat over the entire heating surface. Disadvantages, for example, compared to ceiling heating, are in not using the entire floor area due to the distribution of furniture. The disadvantage of the underfloor radiant system is also in the slower start-up compared to lightweight ceiling panel systems (Krajčík et al. 2021a, Márquez et al. 2017). **Floor cooling** is gaining traction due to the increasing prevalence of alternative sources of heat and cold and the increasing global temperatures. The performance of a cooling system is influenced by the type of floor surface layer. The biggest advantage that speaks for floor cooling is

the possibility to use existing floor heating. This option represents a theoretically zero investment in the cooling system. In practice, however, it requires minor modifications on the heat and cold source side. Compared to the cost of the whole cooling system, these modifications represent only a fraction. (Krajčík et al. 2021a, Márquez et al. 2017). However, floor cooling may not be suitable for application in residential buildings.

The wall-mounted radiant system can both heat and cool. The high comfort of floor heating and the flexibility of radiator heating come together in a **wall radiant heating** system that can be an efficient and economical solution. The only condition is to plan the interior of the house or apartment in time, as there should be no pictures or furniture in the wall heating locations. It is possible and advisable to combine wall heating with floor heating, as this combination will achieve even better efficiency. It is possible to reduce the temperature of the heating fluid by several degrees and therefore save on heating. Therefore, combined wall and floor heating is not only a modern feature of a house or apartment but is a very sensible long-term solution (Akbulut et al. 2016). **Wall cooling** is an option where people don't mind the cold from the feet or the cooling from the cold air flow. Still, it may be more favourable for the human perception of heat/cold than draught cooling (classical air conditioning).

## 2 EXPERIMENTAL DESIGN AND CONSTRUCTION STEPS

The experimental measurements were carried out in three north-east facing office rooms of an office building, with the same boundary conditions.

### 2.1 LABORATORY WITH THREE RADIANT SYSTEMS

In the first office room number 202.1, an Uponor Siccus dry radiant floor system was installed in two circuits with 150 mm pipe spacing, Comfort Pipe PLUS 14 x 2.0 mm pipe, with a radiant area of 15 m<sup>2</sup> (Fig. 2). In room number 202.2, an Uponor Renovis dry radiant ceiling system with Uponor PE-Xa pipe 9.9 x 1.1 mm with 8 Uponor Renovis 2000 x 625 mm panels was installed with a radiant area of 10 m<sup>2</sup>. In the third office room number 203 a Uponor Renovis wall-mounted radiant system with Uponor PE-Xa pipe 9.9 x 1.1 mm with 8 Uponor Renovis 2000 x 625 mm panels and a radiant area of 10 m<sup>2</sup> was installed. The heat and cooling source was an air-to-water heat pump NIBE F2040-6.

### 2.2 CONSTRUCTION STEPS OF RADIANT FLOOR SYSTEM

In Fig. 1 is the office room number 202.1, where the radiant floor system was investigated, and on the left in Fig. 1 you can see a model of the Uponor Siccus dry floor system. The location plan of the sensors is on the right of the Fig. 1. Numbers 2, 14, 15, 18, 19, 20, 47, 49, 50, 51, 52 represent the sensors type PT100 CRZ-2005-100-A-1-Ni and number 55 represents the heat flux sensor type FQA017CSI with accuracy within  $\pm 5\%$  of the measured value.

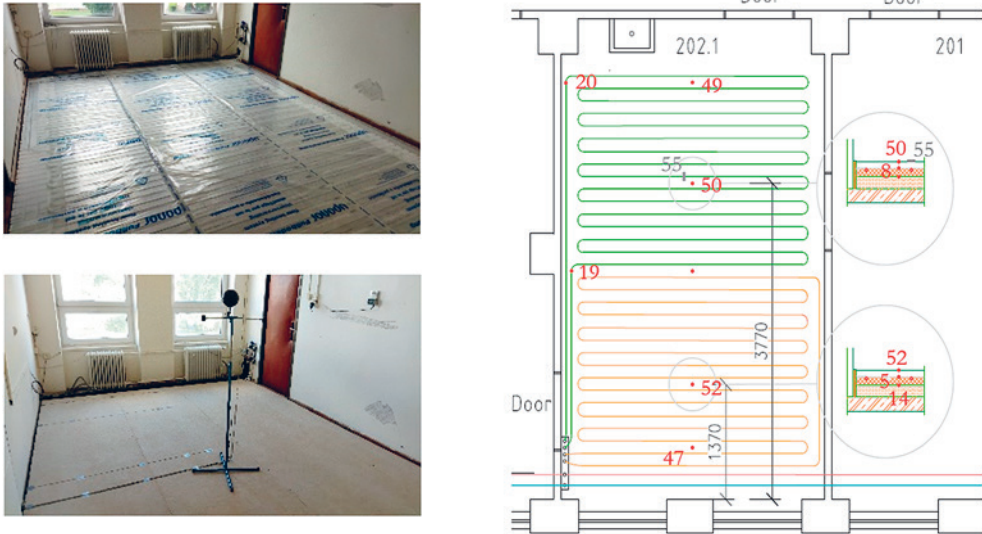


Fig. 1: Location of sensors in the room 202.1 with radiant floor system (Šimko, Uponor; s.r.o.)

In Fig. 1 is the Uponor Siccus dry floor system. The figure shows the Uponor Siccus system board and installation of the sensors, and the installation of the Uponor comfort pipe plus 14 x 2,0 mm. The final layer was represented by the PE foil and the floor dry-screed board BRIO.

### 2.3 CONSTRUCTION STEPS OF RADIANT CEILING SYSTEM

In Fig. 2 is the office room number 202.2, where the radiant ceiling system was investigated, and on the left in Fig. 2 you can see a model of the Uponor Renovis dry ceiling system. The plan of the location of the sensors is on the right of the figure. Numbers 3, 6, 7, 11, 12, 13, 41, 43, 44, 45, 46 represent the sensors type PT100 CRZ-2005-100-A-1-Ni and number 53 represent the heat flux sensor type FQA017C with accuracy within  $\pm 5\%$  of the measured value.

Fig. 2 shows the construction of the Uponor Renovis under the original ceiling structure. The Uponor Renovis ceiling system represents a dry ceiling system. In Fig. 2 you can see CD profiles for the Uponor Renovis panels with Uponor PE-Xa pipe 9.9 x 1.1 mm, and the Tichelman loop with supply and return pipe for the Uponor Renovis panels. In Fig. 2 we can also see installation of the sensors type PT100 CRZ-2005-100-A-1-Ni.

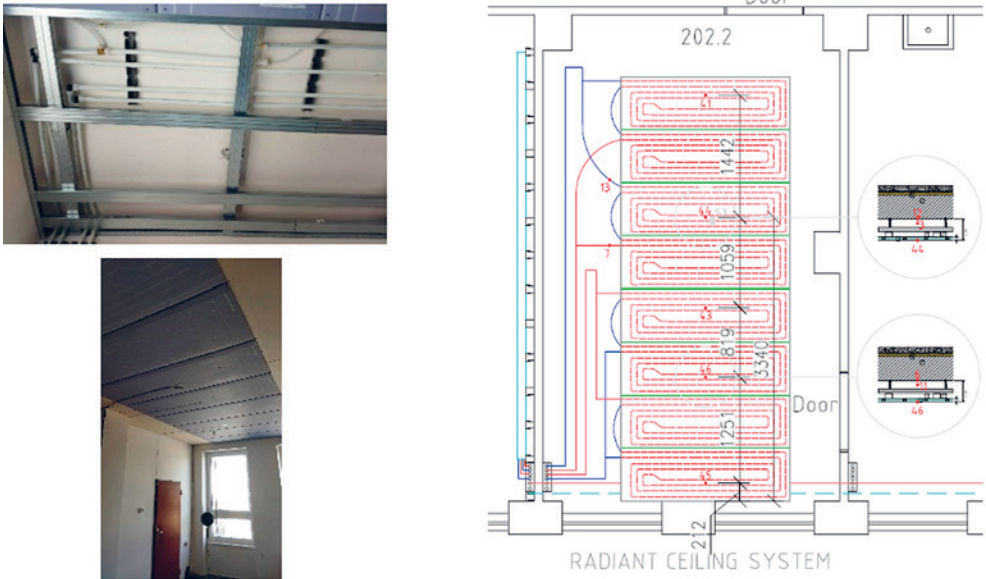


Fig. 2: Location of sensors in the room 202.2 with radiant ceiling system (Šimko, Uponor, s.r.o.)

**2.4 BUILDING STEP OF MEASURED RADIANT WALL SYSTEM**

Fig. 3 shows the Cross section through the office room number 203, where the radiant wall system was investigated.

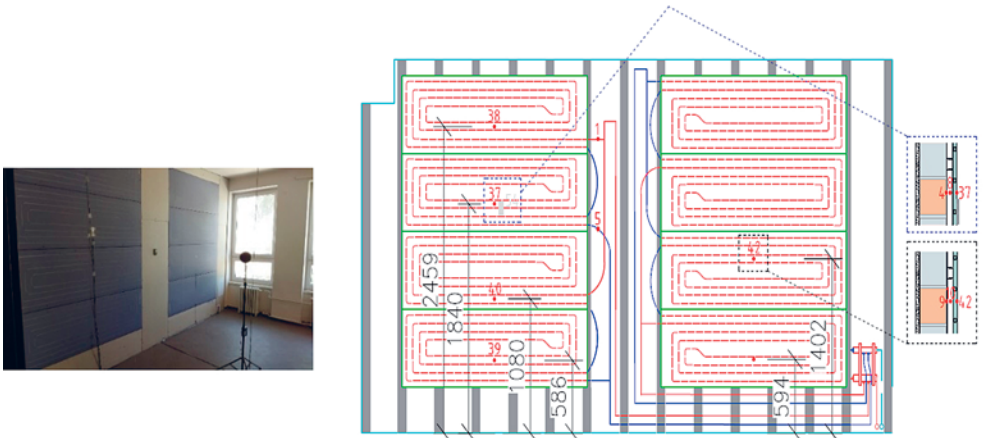


Fig. 3: Radiant wall system with position of sensors (Šimko, Uponor, s.r.o.)

In Fig. 3 is a model of the Uponor Renovis dry ceiling system, the plan of the location of the sensors is on the right-hand side. Numbers 37, 38, 39, 40, 42 represent the sensors type PT100 CRZ-2005-100-A-1-Ni and number 54 represents the heat flux sensor type FQA017C with accuracy within  $\pm 5\%$  of the measured value.

Fig. 3 shows the Uponor Renovis wall system built upon the original wall structure. The Uponor Renovis is a dry wall system and consists of Uponor Renovis panels (2000 x 625 mm). The area of the wall system is 10 m<sup>2</sup>. Fig. 3 shows also the final structure of the Uponor renovis system for the radiant wall which consists of CD profiles with Uponor Renovis panels.

### 3 CONCLUSION

The paper shows the steps of building the laboratory for simultaneous testing of radiant floor, ceiling, and wall systems. The conclusions that may be drawn from this study are as follows:

- There is a significant potential for the three radiant systems to create good thermal comfort, but each of the systems can be suitable for application under different conditions. Therefore, their direct simultaneous comparison would be useful.
- The systems are suitable for combination with a heat pump. Optimal operation strategies of the heat pump with each of the radiant systems should be investigated under summer and winter conditions.

In future research, it would be good to verify the three radiant systems:

- in terms of performance in both cooling and heating mode,
- how much energy does each radiant system consume individually,
- the temperature profile of each office in both cooling/heating mode,
- the surface temperatures of the radiant systems.

### ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-21-0144 and by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic grant VEGA 1/0303/21 and 1/0303/21. We thank companies UPONOR, s. r. o., PAVJAN, s. r. o., EPITREND, s. r. o., SAMDO, s. r. o. and FLEXIM, s. r. o., for the support.

### LITERATURE

- Akbulut U., O. Kincay O. Z. & Utlu Z. (2016) Analysis of a wall cooling system using a heat pump. *Renew Energ* 85.
- Babiak J., Olesen B.W. & Petráš D. (2013) Low temperature heating and high temperature cooling. *Rehva Guidebook No 7. Rehva*, 108.
- Krajčák M., Arıcı M. Šikula O. & Šimko M. (2021a) Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers. *Energy and Buildings*. vol. 253.
- Krajčák M., Šimko M., Šikula O., Szabó D. & Petráš D. (2021) Thermal performance of a radiant wall heating and cooling system with pipes attached to thermally insulating bricks, *Energy and Buildings*. vol. 246.
- Krajčák M. & Šikula O. (2020) The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings. *Applied Thermal Engineering* 164, 114490.
- Lakatos Á. (2016) Comprehensive thermal transmittance investigations carried out on opaque aerogel insulation blanket. *Materials and Structures* 50.
- Márquez A.A., López J.M.C., Hernández F.F., Muñoz F.D. & Andrés A.C. (2017) A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both. *Energy Build* 138.
- Mikeska T. & Svendsen S. (2013) Study of thermal performance of capillary micro tubes integrated into the building sandwich element made of high performance concrete. *Applied Thermal Engineering*

52, 576–584.

Wu X., Fang L., Olesen B.W., Zhao J. & Wang F. (2018) Comparison of indoor air distribution and thermal environment for different combinations of radiant heating systems with mechanical ventilation systems. *Building Services Engineering Research and Technology* 39, 81-97.

Contact:

Martin Šimko

Slovak University of Technology

Faculty of Civil Engineering

Radlinského 2766/11

810 05 Bratislava

[martin.simko@stuba.sk](mailto:martin.simko@stuba.sk)

+421 910 973 812

# Is the air in primary schools as bad as we think?

P. Štefanič

*Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services Slovak Republic*

**ABSTRACT:** Poor thermal insulation and inadequate ventilation are major issues in schools. Natural ventilation through windows is no longer sufficient for maintaining indoor air quality. Poor indoor air quality in schools can negatively impact the health of students and teachers. Non-toxic building materials should be used to ensure a healthy atmosphere. Most schools were built in the 20<sup>th</sup> century and lack proper indoor microclimate conditions. Natural ventilation is ineffective in busy locations and during cold months. This study aims to help improve classroom IAQ and reduce symptoms associated with poor indoor air quality. Municipal authorities and practitioners can use this study to provide a healthier indoor environment. Improving indoor air quality is crucial for maintaining a safe and healthy learning environment for students and teachers.

## 1 INTRODUCTION

The air quality in primary schools can vary depending on a variety of factors such as the location of the school, the ventilation system, and the amount of outdoor pollution in the surrounding area. However, studies have shown that indoor air quality in some primary schools can be of concern and potentially impact students' and teachers' health and well-being (Rakši 2021).

One of the main contributors to poor indoor air quality in schools is the presence of pollutants such as volatile organic compounds (VOCs) from cleaning products and building materials, as well as fine particulate matter from outdoor pollution. Additionally, inadequate ventilation can lead to a build-up of carbon dioxide and other indoor air pollutants (Zhang et al. 2006).

Children can be particularly vulnerable to the effects of poor indoor air quality because they breathe more air per unit of body weight than adults, and their developing bodies are more susceptible to the negative effects of pollutants. Exposure to poor indoor air quality has been linked to various health issues, including respiratory problems, allergies, asthma, and decreased cognitive function (Vouriot et al. 2021).

To ensure a healthy learning environment, it's important for primary schools to prioritize indoor air quality through measures such as proper ventilation, regular cleaning with non-toxic products, and using building materials that do not emit harmful chemicals (Wargocki & Wyon 2021).

## 2 EXPERIMENTAL MEASUREMENT

A short-term measurement of selected indoor environmental parameters was carried out in a 6<sup>th</sup>-grade classroom of a primary school for one working week. The classroom, measuring approximately 8.1 m × 7.3 m × 3.7 m, contained 16 school desks, a chair and the usual classroom equipment.

### 2.1 THE OBJECTIVE OF THE MEASUREMENT

The aim of the experimental measurement was:

- To verify whether the indoor air temperature, indoor relative humidity, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration and PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub> concentration in a primary school classroom meet the requirements specified in relevant legal documents and technical standards,

- assess whether the legal and standard requirements are met, otherwise determine the reasons for non-compliance.

## 2.2 MEASUREMENT METHODOLOGY

### 2.2.1 Methodology in terms of the indoor environmental parameters to be measured

Parameters such as indoor air temperature, indoor relative humidity, CO<sub>2</sub> concentration and PM10 and PM2.5 were measured and have been described in previous chapters.

### 2.2.2 Methodology in terms of measuring instruments

Measurements of indoor air temperature, indoor relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration were carried out using a Vaisala sensor, type GMW90 and a HOBO data logger, type 4 (Fig. 1).



Fig. 1: Vaisala sensor located on the HOBO data logger packaging

The Vaisala sensor has an air temperature measurement range of -5 °C to +55 °C with an accuracy at +10 °C to 30 °C of  $\pm 0.6$  °C. Relative humidity can be measured from 0% to 95% with an accuracy of  $\pm 2.5\%$  at 0 – 60%,  $\pm 3.0\%$  at 60 – 80%, and  $\pm 4.0\%$  at 80-95%. CO<sub>2</sub> concentration can be measured over a range of 0 – 5000 ppm, with accuracy at +10 °C to +30 °C of  $\pm 35$  ppm (VAISALA, 2021).

PM2.5 and PM10 concentrations were measured with a 2nd generation Flow sensor (Fig. 2).



Fig. 2: Flow sensor 2nd generation

The sensor operates in a detection range from 0 to 300  $\mu\text{g}$  and is the only handheld device that can simultaneously measure the widest range of pollutants, namely PM1, PM2.5, PM10, NO2 and VOCs (volatile organic compounds). The manufacturer states that the measured values correlate highly with reference devices, around 90%, which are monitoring stations and laboratory monitors. The principle of particulate matter sensing is to irradiate a laser beam in the air which is fed by a fan contained in the device. Each time a particle is hit, the light is scattered and automatically detected by a photovoltaic cell, which converts the laser beams into an electric current that can already be measured (PLUMELABS 2018).

### 2.2.3 Methodology in terms of time and measurement conditions

The measurement of the selected variables was carried out continuously during the period from 16.1.2023, Monday, when the measuring devices were started at the beginning of the school day. The measurement was completed on Friday 20.1.2023 at the end of the school day. Indoor air temperature, indoor relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration were recorded at 5-minute intervals and PM values were recorded at 1-minute intervals.

### 2.2.4 Methodology in terms of sensor placement

Short-term continuous measurements of the selected variables were carried out in a 6<sup>th</sup> grade primary school classroom. The top of the cupboard was chosen as the measurement location (Fig. 3). All pupils were informed about the ongoing measurements and were asked to take extra care to avoid displacement or damage to the measuring equipment.

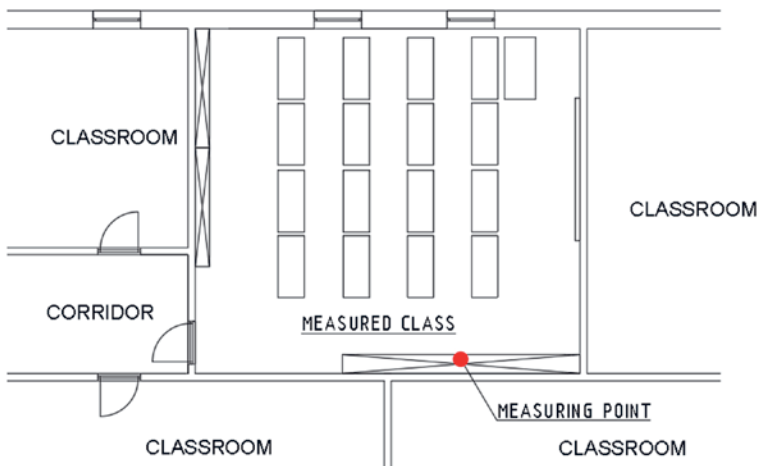


Fig. 3: Floor plan showing the location of the measuring devices in the classroom

## 3 ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS

Indoor air temperature measurements show that at certain time intervals, particularly when pupils were in the classroom, the required values were achieved, but there were some readings where the values were outside the required limit. These were mainly values in the evening, night and morning hours (Fig. 4).

The relative humidity of the indoor air was kept within the required values throughout the measurement (Fig. 4).

The recommended, threshold value for CO<sub>2</sub> concentration was significantly exceeded during the times when the pupils were in the classroom. During the course of the class, the values reached almost twice the recommended limit value. The more significant decrease in CO<sub>2</sub> concentration, during class, was influenced by the ventilation of the classroom, at times when pupils were not in the classroom. These were times when pupils were in PE lessons or at lunchtime. In the afternoon, evening, night and early morning hours, the measured values were below the threshold value (STN EN 16798-1 2019).

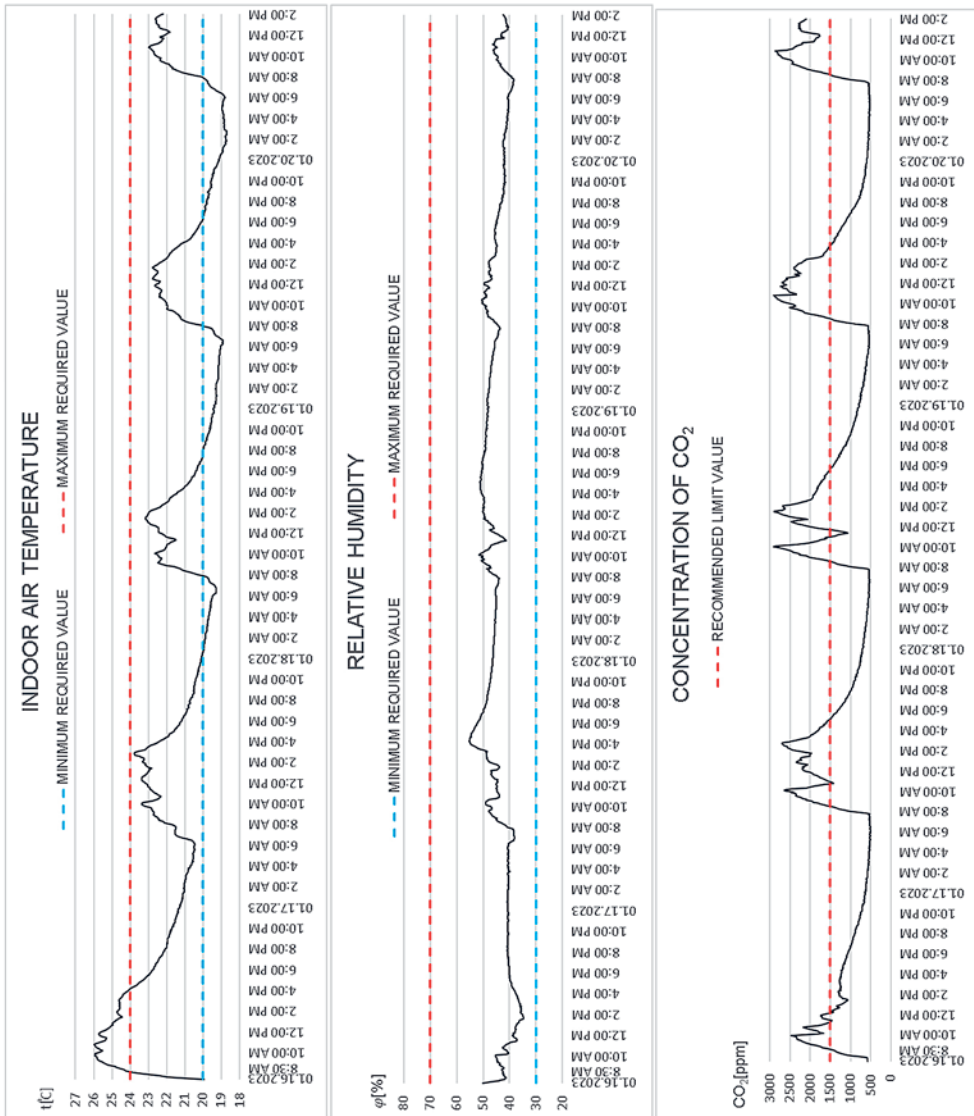


Fig. 4: Graphs of the measured parameters of indoor air quality

The daily mean PM10 concentration was not exceeded on any day (Fig. 5), but it was close to the limit concentration on certain days (Tab. 1).

The daily mean concentration of PM2.5 was likewise not exceeded (WHO, 2021).

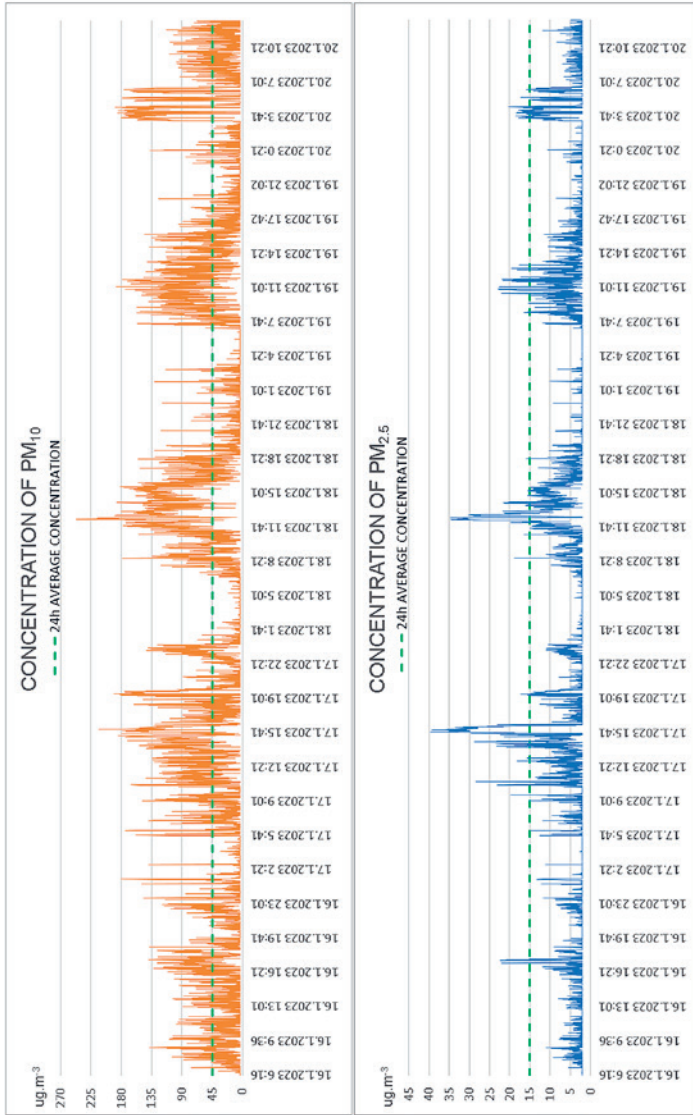


Fig. 5: Graphs of the PM concentrations

Tab. 1: Measured 24h average PM concentrations

Day	24 h avg. concentration of PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 h avg. concentration of PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
16.1.2023	27,74	2,96
17.1.2023	39,53	2,73
18.1.2023	42,24	4,76
19.1.2023	31,55	3,54
20.1.2023	39,39	3,98

## 4 CONCLUSION

Indeed, the overall quality of the indoor environment in school buildings is critical, primarily because of the demands on focused work and cognitive function in learning. At the same time, ensuring a quality indoor environment in schools should be part of a systemic approach to promoting quality education for children, which includes the education system itself, a healthy diet and sufficient exercise, as well as the environment in which children learn.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of Slovak Republic grant VEGA 1/0303/21 and VEGA 1/0304/21.

## LITERATURE

- PLUMELABS (2018) [https://blog.plumelabs.com/2018/08/29/a-handheld-revolution-against-air-pollution/?utm\\_source=zendesk\\_en&utm\\_campaign=faq\\_accuracy](https://blog.plumelabs.com/2018/08/29/a-handheld-revolution-against-air-pollution/?utm_source=zendesk_en&utm_campaign=faq_accuracy), 2018
- Rakši R. (2021) Analýza monitorovania kvality vnútorného prostredia na slovenských školách, [https://bpb.sk/wp-content/uploads/2021/03/Analyza\\_Hlavna%CC%81-c%CC%8Cast%CC%8C-WEB.pdf](https://bpb.sk/wp-content/uploads/2021/03/Analyza_Hlavna%CC%81-c%CC%8Cast%CC%8C-WEB.pdf)
- 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.
- VAISALA (2021) <https://docs.vaisala.com/v/u/B211296EN-F/en-US>
- Vouriot C.V.M., Burrige H.C., Noakes C.J., Linden P.F. (2021) Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air* 2021; 31:1154–1163
- Wargocki P, Wyon D.P. (2021) Research-based recommendations for achieving high indoor environmental quality in classrooms to promote learning, 2021
- WHO (2021) <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>, 2021
- Zhang G., Spickett J., Rumchev K., Lee A.H., Stick S. (2006) Indoor environmental quality in a 'low allergen' school and three standard primary schools in Western Australia. *Indoor Air*, 16:74–80

Contact:

Pavol Štefanič,

Slovak University of Technology in Bratislava

Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services

Radlinského 2766/11

81005 Bratislava, Slovakia

pavol.stefanic@stuba.sk

+421 948 430 807



## AutorInnen

Állóová / TU Bratislava / SK	165
Baldwin / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	23
Banasiak / Montanuniversität Leoben / AT	31
Brunner / FLEXIM GmbH / AT	139
Buchner / Wien Energie GmbH / AT	239, 249
Buruzs / AIT / AT	189
Catal / AIT / AT	189
Czerny / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	199
Díaz Triana / ECODESIGN / AT	287
Doczekal / GET / AT	175
Dragosits / Forschung Burgenland GmbH / AT	123, 131
Ernst / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	23
Ettwein / FH Technikum Wien / AT	77
Fallmann / TU Wien / AT	49, 281
Figl / IBO / AT	175
Gnam / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	273
Gumhalter / AEE INTEC / AT	53, 101
Halper / FLEXIM GmbH / AT	139
Haslehner / FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH / AT	39
Helnwein / FH Technikum / AT	223
Hengel / AEE INTEC / AT	55, 175
Heschl / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	31
Hollaus / Vasko+Partner GmbH / AT	189
Huemer-Kals / IBO / AT	175
Ilko / FLEXIM Flexible Industriemesstechnik GmbH / DE	139
Jasek / Forschung Burgenland GmbH / AT	273
Keller / BOKU Wien / AT	85, 93
Khatibi / TU Wien / AT	207
Kirchknopf / Forschung Burgenland GmbH / AT	31
Kling / BOKU Wien / AT	85, 93
Koch / FH Kufstein / AT	231
Kozek / TU Wien / AT	49, 281
Krail / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	239, 249
Krajčák / TU Bratislava / SK	297
Kremsner / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	17
Kröpfel / JOANNEUM RESEARCH / AT	215
Krottil / FH-Burgenland GmbH / AT	249
Krutzler / JOANNEUM RESEARCH / AT	215
Kührer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	55
Kurz / Green Energy Lab / AT	69
Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT	39
Lösch / TU Wien / AT	49, 281
Medwennitsch / Forschung Burgenland GmbH / AT	273

Michel / FH Technikum / AT	223
Natiesta / AIT / AT	189
Petráš / TU Bratislava / SK	297
Pfeiffer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	17
Piringer / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	239, 259
Poks / TU Wien / AT	49
Pröll / BOKU Wien / AT	85, 93
Puchegger / Forschung Burgenland GmbH / AT	273
Ramschak / AEE INTEC / AT	101
Rixrath / Josef Ressel Zentrum / AT	239, 259
Sabo / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	259
Sanz / TU Graz / AT	249
Schauer / Josef Ressel Zentrum / AT	239, 259
Schindler / Forschung Burgenland GmbH / AT	273
Schittl / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	249
Schnitzer / Forschung Burgenland GmbH / AT	181
Schuh Czerny / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	199
Šimko / TU Bratislava / SK	297
Sipetic / AIT / AT	189
Štefanič / TU Bratislava / SK	303
Stelzer / Forschung Burgenland GmbH / AT	123
Stocker / FH Kufstein / AT	231
Straková / TU Bratislava / SK	157, 165
Strenk / TU Bratislava / SK	157
Supper / Green Energy Lab / AT	69
Szabó / TU Bratislava / SK	297
Walter / TU Wien / AT	207
Weber / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	239
Weidinger / Fachhochschule Burgenland GmbH / AT	17
Weiss / JOANNEUM RESEARCH / AT	215
Wessner / AEE INTEC / AT	149
Widauer / AIT / AT	189
Wolf / BOKU Wien / AT	85, 93
Ziermann / Forschung Burgenland GmbH / AT	123, 181
Zisser / Wien Energie GmbH / AT	239, 249
Zotter / AEE INTEC & FH Joanneum / AT	109