

Selbstlernendes Empfehlungssystem zur Steigerung der Behaglichkeit

M. RABENSTEINER, R. PRATTER

Award Energy Research GmbH, Graz, Österreich

L. GNAM

Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: Within the project „Empower Citizens” technical as well as social and health aspects are combined in order to increase the subjective comfort inside a flat with respect to room temperature, CO₂ concentration, humidity, and so forth. Therefore, a low-cost system advisory system is developed which reads the aforementioned data from sensors situated in the different rooms of a flat. Using these measurements advices are given in order to increase the resident’s comfort. The advices are based on the computation of the so-called predicted mean value (PMV) which aims at capturing the comfort with respect to different parameters, e.g., age, body weight, and height.

To achieve this goal, first, a co-simulation using Matlab and IDA-ICE was conducted utilizing a detailed model of the investigated flat. The model is split into two different zones, living room and bedroom, where a zone is defined through the presence of dedicated sensors inside the zone. The sensor data are transmitted to a central station, which reads also outside temperature and humidity, and form the basis for the PMV computation. If the PMV exceeds pre-defined limits, an advice is given, either to open a window or the shadow a window. Additionally, an advice is output if the CO₂ concentration is too high. Furthermore, the advisory system is capable of learning how well the given advices are followed by the resident. Thus, the total number and the times at which advices are output can be flexibly adjusted by the system itself to optimally suit the resident’s fondness for following the advices.

To evaluate the developed advisory system a parameter study was conducted evaluating different reference cases with respect to the parameters affecting the PMV calculation, e.g., age and bodyweight. Additionally, different motivations to follow the given advices were modeled within these reference cases. The simulation results prove that following the advices given by the advisory system leads to increased comfort for the residents while keeping the increase in energy demand for heating occurring from more ventilation to a minimum. Additionally, the study shows that ventilation only in the morning results in high CO₂-concentrations heavily influencing the resident’s comfort.

Furthermore, this study presents a first easy-to-install hardware prototype comprised of a RaspberryPi 3B+ and an ARDUINO MKR1000 where the developed algorithm for the advisory system can be deployed. This prototype includes also the required sensors to monitor room temperature and CO₂ concentration. In order to output the computed advices, it is equipped with an LCD display acting as human machine interface.

1. EINLEITUNG

Das Stadtentwicklungsprojekt “Empower Citizens” basiert auf der Hypothese, dass durch eine aktive und niederschwellige Sozialraumbeflussung ein Empowerment von technischen Innovationen und Investitionen sowie Veränderungen des NutzerInnen-Verhaltens im urbanen Raum ermöglicht wird. Gegenstand des Projekts ist die partizipative Umsetzung von integrativen Low-Cost Energiemanagementlösungen und neuartigen Gebäude- und Energietechnologien, sowie neuen Finanzierungs- und Geschäftsmodellen über Modernisierungen / Bestandssanierungen im ökosozialen Wohnbau in der südburgenländischen Kleinstadt Pinkafeld.

Im Rahmen des Projekts werden technische Lösungen mit sozial- und gesundheitswissenschaftlichen Fragestellungen verschmolzen. Ziel ist es die Lebensqualität der BewohnerInnen und die ökosoziale Nachhaltigkeit im Wohnbau zu steigern, ohne die BewohnerInnen zu bevormunden. Die partizipativen Aktivitäten dienen vielmehr dazu eine Sensibilisierung der BewohnerInnen für technische Problemstellungen sowie das Vermitteln von Zusammenhängen zu erreichen. Durch die aktive Einbindung der BewohnerInnen und die Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte der Nachhaltigkeit (gesundheitliche, soziale, ökonomische, ökologische) werden integrale Lösungsansätze entwickelt, welche in Folge umgesetzt werden. So wurde im Zuge des Projekts ein flexibel konfigurierbares, für Nachrüstung geeignetes und von den BewohnerInnen lernendes Energiemanagementsystem entwickelt, das auch den finanziellen Aspekt über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Außerdem werden die nutzerspezifischen Gewohnheiten berücksichtigt.

2. PILOTGEBÄUDE

Bei den Pilotgebäuden handelt es sich um zwei Wohngebäude, welche Anfang der 1970er Jahre errichtet und 2010 thermisch saniert wurden. Beide Gebäude haben eine ähnliche Raumaufteilung, sind unterkellert und dreigeschoßig. In jedem Geschoß befinden sich 4 Parteien. Demnach sind in beiden Wohngebäuden zusammengenommen 24 Wohnungen vorhanden. Die Wohnungen werden vorwiegend als Einpersonenhaushalte geführt und haben jeweils eine Nutzfläche von etwa 46 m². Jede Wohnung besitzt einen Balkon der sowohl vom Schlaf- als auch vom Wohnzimmer aus begangen werden kann. Darüber hinaus haben beide Zimmer ein Fenster, welches in die gleiche Richtung wie die Balkontür ausgerichtet ist. Alle weiteren Räume (Bad, Klo etc.) besitzen keine Fenster.

3. FUNKTIONSWEISE DES EMPFEHLUNGSSYSTEMS

Das im Projekt „Empower Citizens“ entwickelte Empfehlungssystem unterstützt den Nutzer dabei, durch optimales Lüften und Verschatten, das Raumklima zu verbessern, ohne dabei unnötige Lüftungsverluste hinnehmen zu müssen. Je nach Wahl der Referenzfälle, kann auch eine Senkung des Heizbedarfs bzw. bei aktiver Kühlung des Kühlbedarfs, erreicht werden. Bei diesem System wurde auf die ausschließliche Verwendung von kostengünstigen Komponenten geachtet. Das System wurde mit Software in the Loop vorab in den Simulationsumgebungen IDA-ICE und Matlab erfolgreich getestet. Im Zuge der Umsetzungsphase wurde das Modell validiert.

Die Beurteilung der Behaglichkeit erfolgt über den sogenannten PMV-Index (Predicted Mean Vote), welcher die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen voraussagt, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Dieser Wert ist abhängig von der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, dem Energieumsatz, der Bekleidungsisolation, der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit. Je weiter dieser Wert von 0 abweicht, umso höher ist die Anzahl der unzufriedenen Personen, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Über- oder unterschreitet der aktuelle PMV-Index eine zuvor eingestellte Toleranzgrenze so versucht das System durch die Ausgabe von Empfehlungen die Behaglichkeit für die Personen wieder zu steigern. Diese Behaglichkeitssteigerung kann entweder über Stoßlüften oder Verschatten geschehen. Parallel zu dieser Funktion der Behaglichkeitssteigerung gibt das System auch aus, wann die CO₂-Konzentration in der Zone überschritten wird, und eine Stoßlüftung notwendig ist.

Die Wohnungen werden in verschiedenen Zonen unterteilt, die unabhängig voneinander vom Empfehlungssystem beurteilt werden. Eine Zone ist durch das Vorhandensein einer eigenen Messstation (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂) und der Möglichkeit der Beeinflussung des Raumklimas durch das Verschatten oder das Öffnen von Fenstern definiert. In den Wohnungen der Pilotgebäude sind das jeweils zwei Zonen (Schlafzimmer, Wohnzimmer). Die Behaglichkeit in den einzelnen Zonen wird etwas vereinfacht ohne Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit und der Strahlungstemperatur durchgeführt. Die Messsignale aus den einzelnen Zonen werden über Funk an eine zentrale Ausgabestation in der jeweiligen Wohnung übermittelt. Weiters muss diese zentrale Ausgabestation die aktuelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit von einer

Außenwetterstation per Funk erhalten. Aus Kostengründen und aus Gründen der einfacheren Installation wurden keine kabelgebundenen Systeme verwendet.

Einen beispielhaften Aufbau des Systems anhand einer Wohnung mit zwei Zonen ist in Abb. 1 ersichtlich.

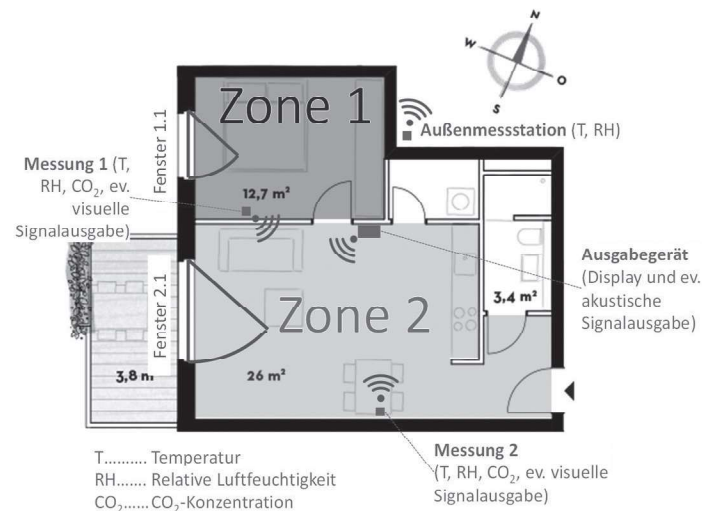


Abb. 1: Beispielhafter Aufbau des Empfehlungssystems in einer 2-Zonen-Wohnung

Nach der Installation des Systems arbeitet dieses noch nicht vorrausschauend. Das heißt, dass erst ein Befehl ausgegeben wird, wenn eine Toleranzgrenze überschritten wird und eine Aktion (Stoßlüften oder Verschatten) eine Behaglichkeitssteigerung oder eine Energieeinsparung zur Folge hat. Zur Senkung des Energiebedarfs sind aber auch vorgegebene Empfehlungen sinnvoll, welche vor allem das Verschatten betreffen. Ziel ist es, Empfehlungen dann auszugeben, wenn Personen in der Wohnung sind und diese motiviert sind diese Empfehlungen auch durchzuführen. Geht jemand beispielsweise täglich um 7 Uhr außer Haus, kann es sinnvoll sein eine Verschattungsempfehlung für einen späteren Zeitpunkt bereits vorgezogen auszugeben, so dass dieser noch vor dem Verlassen der Wohnung ausgeführt werden kann. Außerdem soll dadurch die Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen minimiert werden. Die betroffenen Personen dürfen sich keinesfalls von dem System belastet fühlen. Diese vorgezogenen Empfehlungen können entweder über die fixe Eingabe von Zeitslots erreicht werden oder in einer weiteren Version mithilfe eines selbstlernenden Algorithmus.

Ist der selbstlernende Algorithmus aktiviert, versucht das System zu erkennen zu welchen Zeitpunkten bevorzugt Befehle angenommen werden. Bei einer Fensterlüftung kann die Detektion relativ einfach durch die CO₂-Konzentration geschehen, sofern die CO₂-Konzentration zwischen der Raum- und der Außenluft zum Zeitpunkt der mutmaßlichen Ausführung ausreichend unterschiedlich war. Ein starker Abfall der CO₂-Konzentration würde z.B. bedeuten, dass das Fenster geöffnet wurde. Ein weiteres Zeichen ob ein Fenster geöffnet wurde, ist wenn sich die Zonentemperatur der Außentemperatur anpasst, obwohl die vorherrschenden Parameter ein anderen Temperaturverlauf voraussagen würden. Die als angenommen erkannten Befehle werden gespeichert und sobald genügend Befehle vorhanden sind mit einem statistischen Ansatz ausgewertet. Dazu werden die angenommen und die ausgegebenen Befehle abhängig von der Uhrzeit, dem Wochentag und dem vorherrschenden PMV-Wert ausgewertet. Werden zu einem Zeitpunkt viel Befehle ausgegeben aber wenig angenommen ist das ein Hinweis auf eine häufige Abwesenheit oder Demotivation des Bewohners während dieser Zeit. Werden umgekehrt viele der ausgegebenen Befehle angenommen nimmt das System an, dass der Bewohner zu dieser Zeit häufig zu Hause ist. Unterschiedliche

Anwesenheiten an verschiedenen Wochentagen werden ebenfalls berücksichtigt. Darauf basierend kann automatisch ein Anwesenheitsprofil erstellt werden, welches in regelmäßigen Abständen mit neuen Daten upgedatet wird. Neben der Erstellung des Anwesenheitsprofils, versucht das System auch den Komfortbereich der Bewohner zu erkennen. Wenn z.B. eine Person das Fenster bevorzugt ab einem PMV-Index von 1 öffnet, obwohl die Empfehlung bei der Initialisierung des Systems schon bei 0,5 ausgegeben wird, wird angenommen, dass diese Person ein wärmeres Raumklima bevorzugt und die PMV-Grenzen werden verschoben. Um den Einfluss von Befehlen, die aufgrund von Abwesenheiten erst bei einem höheren PMV angenommen werden zu minimieren, werden nur jene Befehle für die Beurteilung des Komfortbereichs gezählt, die während der vermuteten Anwesenheit ausgegeben bzw. angenommen werden. Da das gleiche für die Erstellung des Anwesenheitsprofils gilt, wird dieser Prozess iterativ ausgeführt.

4. SIMULATION

4.1 SIMULATIONSaufbau

In einer Co-Simulation mit den beiden Programmen Matlab und IDAICE wurde der Regelalgorithmus des Empfehlungssystems entwickelt (vgl. Abb. 2). Für die Gebäudesimulation wurde in IDA ICE eine Wohnung des Pilotgebäudes im Detail abgebildet. Der Regelalgorithmus des Empfehlungssystems wurde in Matlab programmiert. Um diese beiden Programme miteinander koppeln zu können musste außerdem eine dynamische Schnittstelle zum Datenaustausch entwickelt werden.

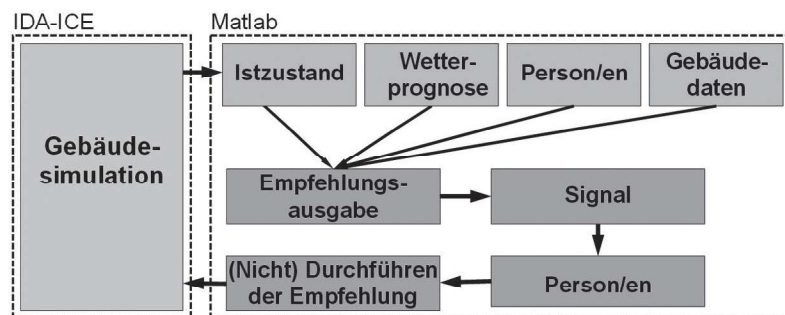


Abb. 2: Schematische Darstellung des Empfehlungssystems in der Simulationsumgebung

4.2 PARAMETERSTUDIE

Mittels einer Parameterstudie wurde die Funktionsweise des Systems untersucht. Dabei wurden verschiedene Personengruppen mit unterschiedlichen Anwesenheitszeiten modelliert und miteinander verglichen. Die Motivation zur Ausführung von Empfehlungen wird abhängig von der Tageszeit variiert. In den Nachtstunden wird diese niedriger angenommen als am Tag. Nur wenn die Person anwesend und motiviert ist, wird eine Empfehlung auch ausgeführt.

In der Simulation wurde ermittelt, dass etwa 95 % der Lüftungsfälle vom selbstlernenden Algorithmus richtig erkannt werden, sofern die Parameter der Detektion optimal eingestellt wurden. Diese Parameter umfassen im Wesentlichen die zeitliche Temperatur- oder CO₂-Konzentrationsänderung und müssen an die Zoneneigenschaften sowie an die Eigenschaften der verwendenden Sensoren angepasst werden. Handelt es sich z.B. um eine große Zone mit nur einer kleinen Fensterfläche wird sich tendenziell ein langsamer Luftausgleich einstellen.

Auch die Lage der Messstation in der Zone muss beachtet werden. Befindet sich die Messstation z.B. in der Nähe eines Fensters, das geöffnet wird, wird sich tendenziell schneller eine Temperaturanpassung an die Außenluft einstellen bzw. wird die CO₂-Konzentration tendenziell schneller sinken. Diese Abhängigkeit konnte vorab in der Gebäudesimulation noch nicht untersucht werden, so dass diese Parameter erst im

Pilotversuch angepasst werden können. Simulationsbedingt konnten für den Regelalgorithmus immer nur die Zustandsgrößen in der jeweiligen Raummitte erfasst werden.

Neben der Parametervalidierung für den selbstlernenden Prozess war die Berechnung der Energieeinsparung und von raumklimatischen Zustandsgrößen Ziel dieser Parameterstudie.

In der Parameterstudie wurden jeweils zwei Referenzfälle betrachtet (Abb. 3 bis Abb. 5). Im ersten Referenzfall (Referenzfall 1) wurde eine sehr demotivierte Person angenommen, welche nur eine geringe Anzahl an Empfehlungen annimmt (und auch ohne die Ausgabe von Empfehlungen weder stoßlüftet noch verschattet). Referenzfall 2 nahm an, dass die im Haushalt lebende Person jeden Morgen eine Stoßlüftung in der gesamten Wohnung durchführt. In der restlichen Zeit bleiben die Fenster verschlossen, und es wird auch nicht verschattet. Diese beiden Referenzfälle wurden mit dem Fall einer durchschnittlich motivierten Person verglichen. Dabei wurde der Schwellenwert der CO_2 -Konzentration jeweils einmal mit 2.000 ppm (EES (2000 ppm)) und 1.200 ppm (EES (1200 ppm)) festgelegt.

4.3 ERGEBNISSE DER SIMULATION

Die Simulation zeigt, dass durch die Aktivierung der jeweiligen Person und der dadurch erwarteten hohen Annahmerate von Empfehlungen, die Behaglichkeit gesteigert werden kann. Die Behaglichkeitssteigerung hängt stark von der Motivation der im Haushalt lebenden Personen ab. Die Ausgabe der Empfehlungen soll zu Zeitpunkten erfolge, an denen die Wahrscheinlichkeit der Ausführung hoch ist. Durch den selbstlernenden Prozess des Systems soll der Benutzer das Gefühl haben, dass das System vorausschauend reagiert, und dieses bereits vor der wahrgenommenen Unbehaglichkeit eine Empfehlung ausgibt.

Auf den Heizwärmebedarf hat das System in diesen Beispielen keinen wesentlichen Einfluss (vgl. Abb. 3a). Durch häufige Anwesenheit und vermehrtes Stoßlüften aufgrund einer Überschreitung der CO_2 -Konzentration kommt es sogar zu einem kleinen Anstieg des Heizwärmebedarfs. Wenn jedoch Zonen aktiv gekühlt werden, kann durch die Annahme der ausgegebenen Empfehlungen der Energiebedarf für das Kühlen um 50 % gesenkt werden. Wird dagegen ein Referenzfall angenommen, in dem die Fenster immer gekippt sind, zeigt die Simulation, einen mehr als 5-fach höheren Heizwärmebedarf als bei EES (2000 ppm).

Durch das oftmalige Stoßlüften kann die durchschnittliche CO_2 -Konzentration in den Zonen gesenkt werden (vgl. Abb. 3b) und ist damit niedriger als in früheren wissenschaftlichen Arbeiten (Lundqvist & Revsbech, 1986; Fehlmann & Wanner, 1993). Eine reine Morgenlüftung führt teilweise zu sehr hohen CO_2 -Konzentrationen und ist demnach keine gute Alternative. Besonders hohe CO_2 -Konzentrationen wurden im Schlafzimmer ermittelt. Dies ist der langen Anwesenheit in der Zone über Nacht und der äußerst geringen Motivation, Empfehlungen in den Nachstunden entgegenzunehmen, geschuldet. Nur im Referenzfall 2 wurde im Wohnzimmer eine höhere CO_2 -Konzentration ermittelt. Zu begründen ist das damit, dass in diesem Referenzfall am Morgen gelüftet wird, und die im Haushalt lebende Person über den Tag sich vorwiegend im Wohnzimmer aufhält. Bei dieser Betrachtung wurde kein Luftaustausch zwischen den Zonen berücksichtigt.

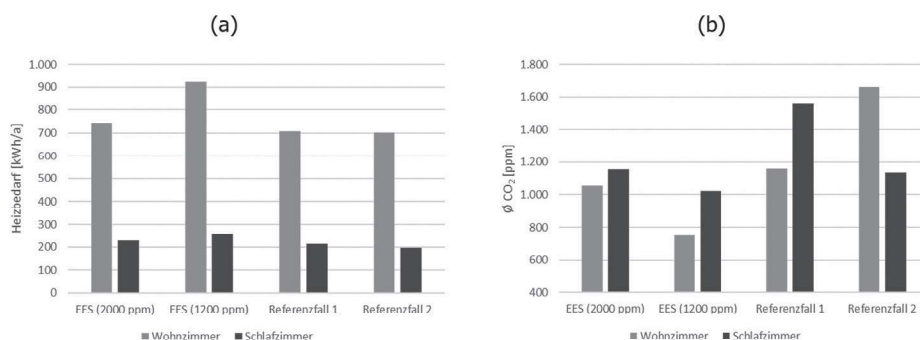


Abb. 3: Heizbedarf(a) und durchschnittliche CO_2 -Konzentration (b) in den einzelnen Zonen

In Abb. 4 ist der PMV-Index (Maximal-, Minimal- und Durchschnittswert) für das Wohnzimmer (a) als auch das Schlafzimmer (b) angegeben. Generell wird ein PMV-Index von 0 vom System angestrebt. Nur wenn durch den selbstlernenden Prozess erkannt wird, dass die Person ein anderes Raumklima bevorzugt, reagiert die Regelung mit der Ausgabe der Empfehlungen dementsprechend. In den abgebildeten Fällen der durchgeführten Parameterstudie wird von den jeweiligen Personen kein wärmeres oder kälteres Raumklima bevorzugt. Demnach wird vom System ein PMV-Index von Null angestrebt.

Bei einer durchschnittlich hohen Annahmerate nähert sich der durchschnittliche PMV-Index dem Optimalwert. Darüber hinaus kann der Maximalwert reduziert und eine wesentliche Verbesserung der Behaglichkeit in beiden Zonen erreicht werden.

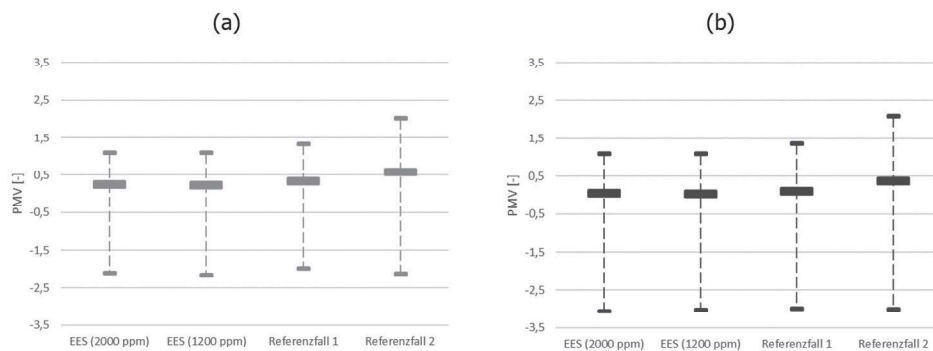


Abb. 4: PMV-Index (Ø, min, max) für das Wohnzimmer (a) und Schlafzimmer (b)

In Abb. 5a ist die absolute Anzahl an ausgegebenen Empfehlungen für ein Jahr im Wohnzimmer abgebildet. Generell werden mehr Empfehlungen zum Stoßlüften als fürs Verschatten ausgegeben. Bei der Einstellung eines niedrigen maximalen CO_2 -Konzentrationspegels von 1.200 ppm werden besonders viel Empfehlungen aufgrund der CO_2 -Überschreitung ausgegeben. Bei der demotivierten Person (Referenzfall 1) werden nur etwa die Hälfte der Empfehlungen für das Stoßlüften ausgegeben. Grund dafür ist, dass die Empfehlungen aufgrund einer CO_2 -Überschreitung lange bestehen bleiben und erst verschwinden, wenn die Person stoßlüftet. Dadurch verringert sich die absolute Anzahl an Empfehlungen. Auf die Dauer, über die diese Empfehlungen ausgegeben werden, hat dies aber keinen Einfluss.

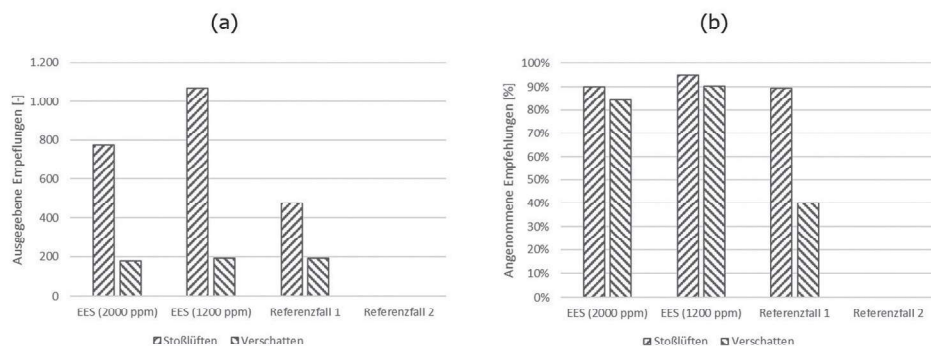


Abb. 5: Auswertung der Empfehlungsannahme für das Wohnzimmer

Diese Tatsache ist auch in Abb. 5b zu sehen. Hier ist der Prozentsatz der angenommenen Empfehlungen für das Stoßlüften etwa gleich hoch wie bei den Fällen in denen motivierte Personen angenommen wurden (Referenzfall 2 und beide EES-Fälle). Nur bei den angenommenen Empfehlungen für das Verschatten gibt es große Abweichungen zu den Fällen mit den motivierten Personen.

5. PROTOTYP

Mit dem System (Raspberry Pi Modell 3 B+ + ARDUINO MKR1000) werden die raum- und außenklimatischen Zustände sowie die CO_2 -Konzentration in den einzelnen Zonen erfasst. Das Raspberry Pi stellt dabei das Basissystem dar, während das ARDUINO Board zum Erfassen der klimatischen Zustände in den weiteren Zonen genutzt wird, und die Messdaten mittels Funkübertragung (1 x 802.11 und 1 x 802.15.4 Norm) an das Hauptsystem übermittelt. Die aufgezeichneten Messdaten werden im Anschluss auf dem Raspberry Pi protokolliert und zur Auswertung der Empfehlung verwendet. In Abb. 6 wird der prinzipielle Aufbau des Funknetzwerks dargestellt. Hierbei wird die Sensorik mit dem MKR1000 verbunden, welches die Daten an die zentrale Basisstation weitersendet. Die Funkmodule sollen aufgrund ihrer flexiblen Aufstellung (Schlafzimmer, Balkon) mit Batterie betrieben werden. In der Zone, in der sich die Basisstation befindet, wird die Zonenmessung von dieser übernommen. Die Sensorik ist in dem Fall direkt verbaut, so dass ein Funkmodul eingespart werden kann.

Die Bewohner werden mit einem umfassenden Partizipationsprozess bei der Mitentwicklung des Empfehlungssystems eingebunden, um eine hohe Akzeptanz und Usability sicher zu stellen. Hierbei spielt vor allem das Display als Mensch-Maschine-Schnittstelle eine entscheidende Rolle.

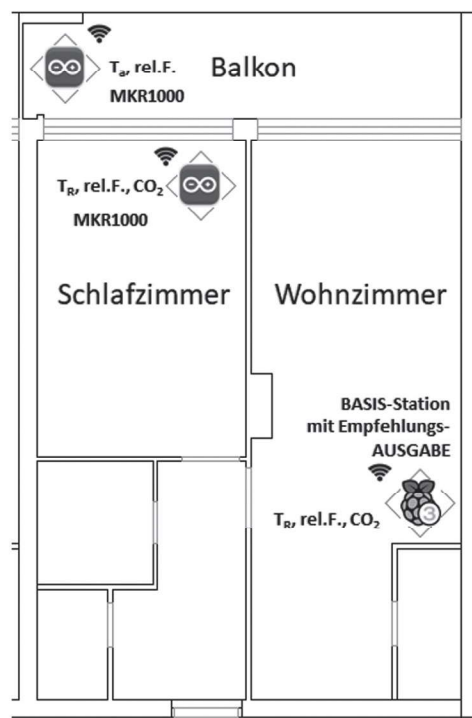


Abb. 6: Aufbau der Versuchsanordnung

Beim RaspberryPi (Modell 3 B+) handelt es sich um einen linux-basierten Mini-Computer mit einer ARM-CPU (Broadcom-BCM2837-SoC, 4-Core in ARMv8), welcher zur Steuerung von elektrischen Geräten, Versuchsaufbauten oder als Mini-Server herangezogen werden kann. Um eine Stand-Alone-Anwendung des Matlab-Codes auf dem RaspberryPi erzeugen zu können, wurde der Matlab-Code in einen Python-Code konvertiert.

Die Aktion selbst wird der/dem BewohnerIn, über die innerhalb eines Partizipationsprozesses entwickelten Bedienoberfläche, auf einem Display als Empfehlung ausgegeben. Um eine einfachere und I/O-Ports sparende Ausführung zu gewährleisten besteht hierbei die Möglichkeit das Display über I2C anzusteuern.

Der Mikrocontroller (Atmel ATSAMW25) sammelt Messdaten (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration) von der Sensorik und sendet diese via Funk (802.11 Norm) an die Basisstation (Raspberry Pi), welche als Server agiert. Das Board selbst muss mit einer Batterie (min. 700 mAh) aufgrund der flexiblen Aufstellungsmöglichkeit (Schlafzimmer, Balkon) versorgt werden und agiert als Client.

6. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Das neuartige Empfehlungssystem verfolgt den Ansatz die Behaglichkeit und das Wohlbefinden zu erhöhen und dabei das Nutzerverhalten hinsichtlich Energieeffizienz zur Erreichung dieser Behaglichkeit zu verbessern. Dabei versucht das System stets das Optimum zwischen Einhaltung der Luftqualität und Minimierung der Lüftungsverluste zu finden. Das System kann dabei als Assistenz des Menschen angesehen werden.

Die Intention des Projektes ist es, den Menschen innerhalb des Regelkreises (z.B. Raumtemperaturregelkreis) einzubinden indem er aktiv als Stellglied (Fensteröffnung, Jalousie) die zu führende Größe beeinflusst. Das Empfehlungssystem ist mit einem selbstlernenden Algorithmus ausgestattet und trainiert sich dadurch die Ausgabe einer Empfehlung eigenständig an. So wird es möglich Verweilzeiten, Schlafphasen und sogar Wochenrhythmen (Werktage, Wochenende) abzubilden und parallel wird vermieden, dass die Empfehlungen von dem/der BewohnerIn als zyklische Störung wahrgenommen wird.

Simulationstechnisch wurde bereits nachgewiesen, dass mit einer entsprechenden Aktivierung der im Haushalt lebenden Person, der Energiebedarf vor allem für das Kühlen in vielen Fällen gesenkt werden kann. Die Auswirkungen auf die Gesundheit der BewohnerInnen sind ebenfalls sehr vielversprechend. Nicht nur die CO₂-Konzentration kann gesenkt werden, auch der PMV-Index kann optimiert werden -beides wesentliche Punkte, zur Steigerung der Behaglichkeit. Generell sind die Resultate sehr stark vom gewählten Referenzfall abhängig. Bei der Annahme einer Person, die sehr selten lüftet, kann die CO₂ Konzentration wesentlich gesenkt werden, allerdings steigen im Gegenzug die Lüftungsverlust an. Da sich eine hohe CO₂ Konzentration schnell negativ auf die Gesundheit auswirkt, muss in diesem Fall ein geringfügiger Anstieg der Lüftungsverlust jedoch hingenommen werden. Nimmt man dagegen eine Person an, die im Winter oft über längere Zeit das Fenster gekippt hält, besteht hier ein großes Potential an Heizwärmeeinsparungen. Lüftet jemand ohnehin schon nahezu optimal, sind die Verbesserungspotentiale geringer. Wie allerdings verschiedene Studien zeigen, sind die Wärmeverluste aufgrund falschen Lüftungsverhaltens in vielen Haushalten noch immer sehr hoch.

In einem erweiterten System soll das System auch statische thermodynamisch wichtige Werte (z.B. Wärmespeicherfähigkeit der Zone, U-Wert, ...) verarbeiten, um die Trägheit der Zonen zu berücksichtigen. Eine Ausweitung des Empfehlungssystems auf das Heizungssystem kann den Energiebedarf weiter senken.

LITERATUR

- Lundqvist G., Revsbech P. (1986): Ventilation in flats. Measurement of carbon dioxide and air exchange in retrofitted flats. *Ugeskr Laeger* 148:3475–3479
- Fehlmann J., Wanner H. (1993): Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. *Indoor Air* 3:41–50

Kontaktinformationen Autor(en):

*Markus Rabensteiner
4ward Energy Research GmbH
Reininghausstraße 13A
8020 Graz
Email: markus.rabensteiner@4wardenergy.at*

*Robert Pratter
4ward Energy Research GmbH
Reininghausstraße 13A
8020 Graz
Email: robert.pratter@4wardenergy.at*

*Lukas Gnam
Forschung Burgenland GmbH
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: lukas.gnam@forschung-burgenland.at*