

# Heizsystem zur Schaffung eines angenehmen und belastungsarmen Raumklimas in Altbauten

## Heating system to provide a comfortable indoor climate and to reduce negative effects on health in old buildings

M. Hein<sup>1</sup>, R. Stöber<sup>1</sup>, G. Fischerauer<sup>1</sup>, J. Bauer<sup>2</sup>, J. Bürner<sup>2</sup>, A. Ketschau<sup>2</sup>, J. Franke<sup>3</sup> und M. Feller<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Zentrum für Energietechnik (ZET), Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth, moritz.hein@uni-bayreuth.de

<sup>2</sup> E|Home-Center, FAU Erlangen-Nürnberg, Fürther Straße 246b, 90429 Nürnberg

<sup>3</sup> Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, FAU Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen

<sup>4</sup> Fa. Frenzelit Werke GmbH, Frankenhammer, 95460 Bad Berneck

### Kurzfassung

Altbauten verfügen oft über Warmwasserheizungen mit Heizkörpern, die die Luft erwärmen und sie so im ganzen Raum in Bewegung bringen. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Vorlauftemperatur der Heizung und führt besonders bei Allergikern, wegen der Aufwirbelung von Staub, Tierhaaren und anderem Schmutz, zu Schwierigkeiten. Bei dieser Art der Beheizung können, besonders an Außenwänden, kalte Stellen entstehen, wo sich Kondenswasser und Schimmel bilden. Die Bewohner verfügen aber meist über keine Möglichkeit durch Einstellungen – z.B. an den Thermostatventilen – alle Nachteile zu verringern oder zu vermeiden. Deswegen besteht bei der Modernisierung von Altbauten der Wunsch, ein Heizsystem einzusetzen, was die genannten Probleme beseitigt, die vorhandene Infrastruktur der Heizkörper weiter nutzt und sich möglichst selbsttätig an die thermischen Bedürfnisse der Bewohner anpasst.

### Abstract

Old buildings are usually heated by a hot-water central heating system using radiators, which warm up the air locally and start it moving by convection. This effect increases with a rising supply temperature and leads to raised dust, animal hair and other dirt which is problematic especially for persons suffering from an allergy. Owing to this kind of heating, particularly exterior walls could stay partially cold and the formation of condensation and mold gets intensified at these spots. Usually, the inhabitants have no control – e.g. by the adjustment of the thermostatic radiator valves – to reduce or avoid all of the disadvantages. Therefore, the redevelopment of old buildings requires a heating system which eliminates the said problems, uses the existing radiators and adapts itself to the thermal needs of the inhabitants.

## 1 Einleitung

Der moderne Mensch verbringt 90 % seiner Lebenszeit in geschlossenen Räumen [1]. Während es inzwischen zahlreiche Bemühungen gibt, das Wohlbefinden des Menschen in Bürogebäuden zu verbessern, werden bisher kaum Anstrengungen unternommen, das Wohlbefinden im privaten Wohnbereich für den Bewohner zu steigern. Ökonomische Faktoren und finanzielle Interessen stehen oftmals vor dem Wohlbefinden des Bewohners. Dabei zählt gerade die Temperatur zu denjenigen Umweltgrößen, die sich dem menschlichen Sinn in besonders hohem Maße erschließen [1]. Auch wenn in deutschen Wohngebäuden kaum intelligente Heizsysteme installiert sind, hat die thermische Behaglichkeit bei Bewohnern einen hohen Stellenwert. Völker, Beckmann und Kornadt zeigen, dass Bewohner die thermische Behaglichkeit gleich nach der Luftqualität als nächstwichtiges Kriterium erachten [2]. Folglich besteht in der Verbesserung der thermischen Behaglichkeit durch intelligente Heizsysteme ein enormes Potential für die Steigerung des Bewohnerkomforts. Vor diesem Hintergrund liegt, neben der technischen Entwicklung, ein Fokus des

Projekts darauf, den Bewohnern – also den potentiellen Nutzern des neuartigen Heizsystems – eine gesteigerte Qualität des Raumklimas und damit verbunden ein benutzerfreundliches System bieten zu können.

### 1.1 Randbedingungen Haus

Laut Statistischem Jahrbuch 2014 [3] wurden 78,6 % der Wohngebäude in Deutschland bis zum Jahr 1990 gebaut. Erst mit der 3. Wärmeschutzverordnung von 1995 wurden die Ansprüche an die Energieeffizienz von Gebäuden deutlich erhöht. Somit existiert ein großer Bestand an Gebäuden mit hohem, durch die Heizung verursachten Energiebedarf. Problematisch ist, dass bei denkmalgeschützten Altbauten eventuell keine isolierenden Maßnahmen an der Fassade möglich sind, dass die Investitionssumme, im Fall von Mehrfamilienhäusern, sehr hoch ist und, dass im Zuge einer Erneuerung der Heizungsanlage eventuell in allen Wohnungen gleichzeitig umfassende bauliche Maßnahmen getätigt werden müssen. Diese Probleme können mit einer Kombination einer elektrischen Flächenheizung mit dem Austausch des bestehenden, zentralen Wärmeerzeugers durch eine Wärmepumpe umgangen werden.

## 1.2 Kurzvorstellung der Wirkungsweise der neuen Heiztechnologie

Die Verwirbelung von Staub im Raum lässt sich durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur verringern, wodurch auch der Einsatz von Luft-/Wasserwärmepumpen möglich wird. Durch die abgesenkte Vorlauftemperatur sind die Heizkörper aber nicht mehr in der Lage, bei niedriger Außentemperatur ein behagliches Raumklima zu schaffen, weswegen elektrisch betriebene infrarot (IR) strahlende Heizfolien als zusätzliche Wärmequelle Verwendung finden. Mit einer Dicke von 0,4 mm lassen sich diese im Rahmen einer Modernisierung einfach und kostengünstig in den Putz einbringen. Die Decke stellt dabei den bevorzugten Einbauort dar, weil hier die Schwierigkeiten mit Verstellung durch Möbel am geringsten sind (bei einem durchschnittlichen Altbau sind ungefähr 60 % der Deckenfläche erforderlich). Bei einer Heizfolientemperatur von 35 °C bis 40 °C erwärmt sich, durch die Infrarotstrahlung, die Hüllfläche des Raumes ohne nennenswerte Konvektion, die zum Aufwirbeln von Schmutz führen könnte. Die höheren Temperaturen der Hüllflächen vermeiden außerdem die Bildung von Kondenswasser und Schimmel und ermöglichen das gleiche Maß an Behaglichkeit auch bei einer abgesenkten Lufttemperatur, wodurch sich Heizenergie einsparen lässt.

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

Aktuelle Lösungsansätze im Bereich der Energieeffizienzsteigerung, vornehmlich von Wohngebäuden, gehen in Richtung automatischer Einzelraumregelung. Dabei werden Stellantriebe für die Heizkörper eingesetzt, mit denen die Raumtemperatur per Funkschnittstelle bequem über ein mobiles Endgerät und teilweise von unterwegs geregelt werden kann [4]. Diese Lösungen bieten zusätzlich die Möglichkeit, individuelle Heizprofile für jeden einzelnen Heizkörper anzulegen und die Temperatur auch direkt über das Thermostat zu regeln. Ein Systemansatz, bestehende elektrische Speicherheizgeräte den Restriktionen der Energiewende anzupassen, wird in [5] aufgezeigt.

### 2.1 Benutzerschnittstelle

Das aktuelle Smart-Home-Umfeld ist geprägt durch proprietäre Insellösungen [6]. Etablierte robust arbeitende kabelgebundene Systeme werden zunehmend durch komfortabel nachrüstbare Lösungen ergänzt, etwa das auf Powerline basierende DigitalSTROM-System [7] oder das funkbasierte Z-Wave-Ökosystem [8]. Es existieren noch keine De-facto-Standards, und der Smart-Home-Markt gestaltet sich weiterhin schwierig [9]. Die beabsichtigte Energiewende führt zu einem gesteigerten Systemanbieterinteresse an Lösungen, die die beiden Domänen Energie und Hausautomation verbinden.

Damit eine Marktdurchdringung erreicht werden kann, sind hersteller- und domänenübergreifend interoperable und nutzerzentriert entwickelte Systemlösungen anzuvisie-

ren [6, 10, 11]. Im Open-Source-Umfeld bilden sich langsam vielversprechende Ansätze für erweiterbare und wartbare Systeme heraus, etwa das openHAB [9] beziehungsweise Eclipse Smart Home Projekt [12]. Idealerweise verfügen diese Systeme über Plug&Play-Installationsroutinen, modular andockbare Mensch-Maschine-Schnittstellen (*human-machine interface*, HMI) und eine Möglichkeit zur System-Modellierung, um bei der Planung des intelligenten Gebäudes zu unterstützen. In einem Smart-Home mit diversen Komponenten ist die zuverlässige Kommunikation und Synchronisation zu bedenken. Hier haben sich Publish-Subscribe-Verfahren unter Zuhilfenahme passender Protokolle bewährt, im Hausumfeld etwa das energiesparende nutzbare Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [9].

### 2.2 Thermische Behaglichkeit im privaten Wohnbereich

Trotz seiner Akklimatisierungsfähigkeit gibt es für jeden Menschen einen Komfortbereich – auch Behaglichkeitsbereich genannt –, in welchem er sich wohl fühlt. Das Behaglichkeitsempfinden wird von vielen verschiedenen Faktoren, wie der Raumlufttemperatur, der Luftgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchte, der Luftzusammensetzung, der Wärmeableitung und der Bodenoberfläche beeinträchtigt. Aber auch physiologische und intermediäre Bedingungen haben einen Einfluss auf die Behaglichkeit [13].

Verschiedene Normen definieren die Behaglichkeit anhand physikalischer und nicht-physikalischer Größen. Beispielsweise gibt die DIN EN ISO 7730 [14] den *predicted mean vote* (PMV) als Behaglichkeitskoeffizienten an, der die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte als physikalische Eingangsgrößen verwendet. Zusätzlich sind die nicht-physikalischen Größen „Tätigkeitsgrad“ und „Bekleidungsgrad“ zur Berechnung des PMVs notwendig. Diese Größen sind messtechnisch schwer zu bestimmen, weshalb Alternativen zum PMV herangezogen wurden. Mit dem *Adaptive-thermal-comfort* (ATC-)Modell [15] wird die Empfindungstemperatur, auch operative Temperatur genannt, für den Wohnraum anhand der gemittelten Außentemperatur berechnet, bei der sich der Großteil einer Gruppe von Personen wohl fühlt [16]. Die operative Temperatur stellt bei Luftgeschwindigkeiten unter 0,1 m/s das arithmetische Mittel aus der Luft- und der Strahlungstemperatur dar, der für die thermische Behaglichkeit einflussreichsten Größen.

### 2.3 Anpassung der Führungsgröße an Nutzungsgewohnheiten

Die Studie von Kane et al. zeigt, dass sich der gewünschte Raumtemperaturverlauf unter der Woche und am Wochenende nahezu gleicht, die Unterschiede zwischen verschiedenen Haushalten, abhängig von Alter und Beschäftigung, hingegen groß sind [17]. Außerdem hängt der Wärmebedarf eines Raumes von dessen Nutzung ab. Beizaee et al. machen durch eine Temperaturregelung für einzelne Räume eine Energieeinsparung von 12 % im Vergleich zu

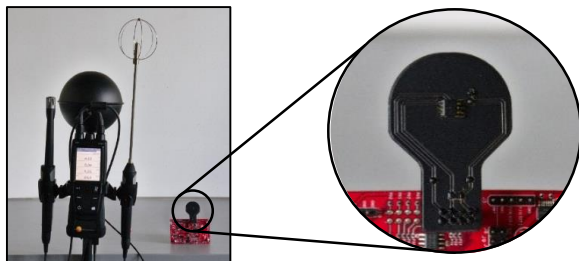
zentral geregelten Heizsystemen aus [18]. Aufgrund des trägen Verhaltens der Regelstrecke müssen deren Zeitkonstanten bei der Anpassung an die Nutzergewohnheiten berücksichtigt werden. So wird bei [18] die Stellgröße der programmierbaren Heizkörperthermostate 30 min vor angenommener Anwesenheit von Personen erhöht. Für die Personenlokalisierung werden beispielsweise CO<sub>2</sub>-Sensoren und passive Infrarotsensoren eingesetzt [19] und die Anwesenheit durch verschiedene Algorithmen vorhergesagt [20].

### 3 Vorgehen

Das Ziel ist ein Heizsystem, das ein für die Bewohner thermisch behagliches Klima herstellt. Die Bewohner stehen im Zentrum der Betrachtung und wurden bereits früh im Entwicklungsprozess in die Gestaltung des Systems und der Benutzeroberfläche eingebunden. Zur Auslegung der Regelung eines solchen Systems muss die Charakteristik der heizenden Komponenten bekannt sein. Die entscheidende Größe für die Regelung ist die Regelgröße. Anhand der Literatur wurde hierfür die operative Temperatur ausgewählt, ein Sensor, in Bezug auf die Fähigkeit diese Größe abbilden zu können, untersucht und dabei die Charakteristik der Heizfolien und der Heizkörper ermittelt.

#### 3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

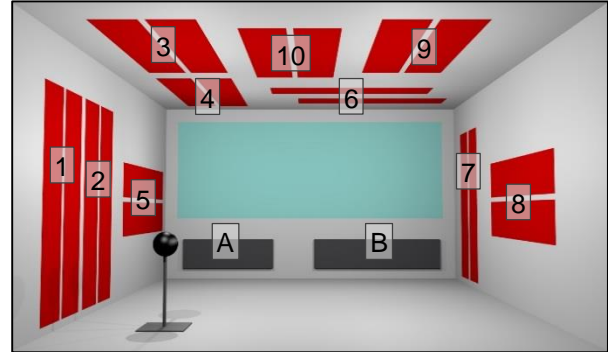
Für die Ermittlung der operativen Temperatur wurde ein Sensor nach [21] aufgebaut und mit dem kommerziellen Klimamessgerät Testo 480 verglichen (siehe **Bild 1**). Um die Abbildungsfähigkeit des Sensors zu überprüfen wurden Versuche zur Charakterisierung der Heizfolien in einem Lehrstuhllabor durchgeführt. Der ca. 40 m<sup>2</sup> große Raum wurde mit den zehn Heizfolienpaaren 1–10 an Decken und Wänden ausgestattet, zusätzlich sind zwei Heizkörper A und B an der Fensterseite vorhanden (siehe **Bild 2**). Die Heizfolien werden mit 36 V betrieben, wobei der Stromfluss durch einen High-Side-Switch unterbrochen wird. Der High-Side-Switch wird von einem Mikrocontroller gesteuert, der ein Pulsweitenmodulationssignal ausgibt, das vorgibt, wie lange die Heizfolien je Taktperiode vom Strom durchflossen werden.



**Bild 1:** Links Klimamessgerät Testo 480 mit dem Globethermometer (schwarz gefärbte Kupferkugel mit 150 mm Durchmesser, Einschwingzeit laut Hersteller 20 Minuten), mit dem die Strahlungstemperatur gemessen wird; rechts aufgebaute Sensor auf Mikrocontroller-Board und Detailansicht des Sensors.

**Tabelle 1:** Die sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala nach [14].

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß



**Bild 2:** Anordnung der zehn Heizfolien (rot); unter dem Fenster (hellblau) die zwei Heizkörper (grau). Die schwarze Kugel repräsentiert die Position des Globethermometers und des Sensors.

**Versuch 1:** Zur Charakterisierung der Heizfolien wurde nacheinander je ein Heizfolienpaar mit Energie versorgt und die Sprungantwort der Regelstrecke mittels Klimamessgerät und Sensor aufgenommen. Der Sensor und das Klimamessgerät wurden nebeneinander in einer Höhe von ca. 1 m über dem Boden platziert. Sie befanden sich unter dem Heizfolienpaar 3 und neben Paar 1. Der Versuch wurde nacheinander für die Paare 1, 3, 4, 5, 6 und 10 durchgeführt.

**Versuch 2:** Zum Vergleich wurde die Heizwirkung der Heizkörper untersucht. Dabei wurden die Heizkörperthermostate zum Zeitpunkt 0 min von der Stellung zwei auf Stellung fünf gedreht. Die Raumtemperatur war zu Beginn konstant und die Heizkörperventile waren nicht wasserdurchströmt.

**Versuch 3:** Abschließend wurde die Auswirkung einer Änderung der Führungsgröße auf die Behaglichkeit zweier Probanden untersucht. Abgefragt wurde die Behaglichkeit anhand der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala der Norm ISO 7730 [14] (siehe **Tabelle 1**) vor Einschalten des Heizsystems und nach dem Ausregeln mehrerer Führungsgrößen sprünge.

#### 3.2 Architektur und Benutzerschnittstelle

Neben der Regelung der Heizfolien ist es entscheidend, für eine passende Anbindung an das Smart Home zu sorgen. Folglich muss eine modulare und erweiterbare Architektur gefunden werden. Diese Architektur muss eine maximale Flexibilität aufweisen, damit die HMI entworfen und problemlos iterativ angepasst werden kann. Auf diesem Weg kann das System nutzerzentriert und agil entwickelt werden [22]. Ebenso ist strategisch eine hersteller- und domänenübergreifende Interoperabilität anzuvizieren. Im Falle

unseres Forschungsprojektes galt es die folgenden Komponenten zu einem Gesamtsystem zu integrieren:

- Außentempersensord
- Wärmepumpe
- Heizfolien im Verbund mit Mikrocontrollern
- Sensorik zur Temperatur- und Personenerfassung
- Middleware mit Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Stellantriebe für die Heizkörper

### 3.3 Integration den Nutzers in den Entwicklungsprozess

Um den Faktor Mensch zu berücksichtigen, wurde ebendieser bei der Entwicklung eingebunden werden. Parallel zu der technischen Entwicklung werden in Anlehnung an den menschenzentrierten Gestaltungsansatz [23] potentielle Nutzer von Beginn an in die Entwicklung integriert. Durch verschiedene Methoden aus der Akzeptanzforschung [24] und dem Usability Testing [25] kommen so fundierte Aussagen über Nutzeranforderungen zusammen. Methodisch wird dabei neben den noch durchzuführenden Behaglichkeitstests in einem Feldversuch auf die Erstellung einer Anforderungsanalyse an das System aus Nutzersicht zurückgegriffen. Durch halbstandardisierte Interviews wurden für eine kleine Stichprobe die Behaglichkeit in den eigenen Wänden und das Maß der Probleme bzw. des Unbehagens in Zusammenhang mit der Temperatur zuhause ermittelt. Gemeinsam mit Ergebnissen anderer Studien [2], [26], [27] konnte somit eine Anforderungsspezifikation aus Nutzersicht erstellt werden.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Versuche zur Heizwirkung mit dem aufgebauten Sensor

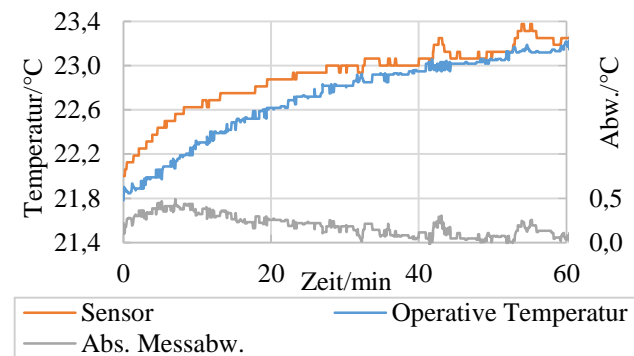
Für den Versuch 1 wurde die operative Temperatur aus den Messdaten des Klimamessgeräts berechnet und mit den Werten des Sensors verglichen (siehe **Bild 3**). Aufgrund seiner geringeren thermischen Masse reagierte der Sensor schneller als das Globethermometer auf die Temperaturänderung während des Aufheizvorgangs der Heizfolien. Daraus ergab sich, für das Heizfolienpaar 3, eine anfängliche absolute Messabweichung von bis zu 0,5 °C. Für die Heizfolienpaare 1, 3, und 6 lieferte der Sensor im stationären Bereich hingegen ähnliche Ergebnisse wie die berechnete operative Temperatur (siehe **Tabelle 2**). Für die Paare 4, 5 und 10 vergrößerte sich die Abweichung. Trotz dessen ist der Sensor im Hinblick auf Größe, Kosten und Einschwingzeit einem Globethermometer vorzuziehen. Das wird ersichtlich, wenn man sich den Einsatz des Sensors als Messglied in einem Regelungssystem mit mehreren Heizzonen im Wohnraum vorstellt. Hier wird je Heizzone mindestens ein, möglichst günstiger und unauffälliger, Temperatursensor mit kurzer Einschwingzeit benötigt.

Im Vergleich zur Raumheizung mit den Heizkörpern A und B (siehe **Bild 4**) beträgt die Zeitkonstante bei der Aufheizung mit dem Heizfolienpaar 14 min anstatt 34 min (Versuch 2). Das lässt sich einerseits mit der geringeren

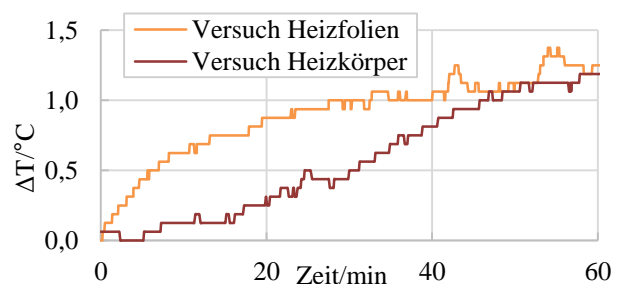
Entfernung der Wärmequelle vom Sensor und andererseits mit der Wärmeübertragung durch Infrarotstrahlung erklären. Durch die Verteilung der Heizfolien im Raum vermindert sich der unangenehme Effekt der heißen Wärmequelle in Form der Heizkörper. Die Wärme kann gleichmäßiger und näher an den Personen in den Raum eingebracht werden, was, vor allem bei weit von den Heizkörpern entfernten Raumpunkten, zu einer schnelleren Erwärmung führt. Außerdem wird, aufgrund der maximalen Oberflächentemperatur von maximal 40 °C der Heizfolien, Konvektion im Raum reduziert.

**Tabelle 2:** Quadratischer Mittelwert (QMW) der absoluten Messabweichung der Werte des Sensors von der berechneten operativen Temperatur des Klimamessgeräts der letzten 10 min der Messung.

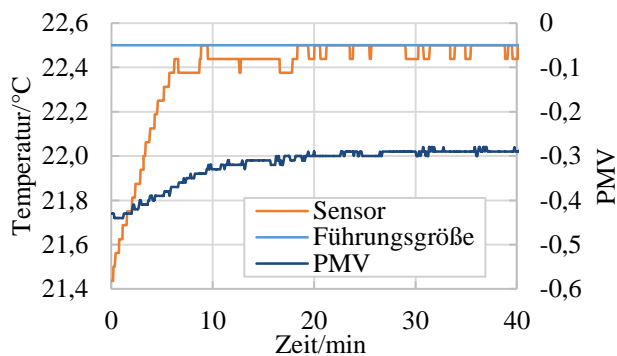
Heizfolienpaar	1	3	4	5	6	10
QMW/°C	0,15	0,12	0,31	0,44	0,06	0,8



**Bild 3:** Transienter Verlauf der operativen Temperatur in einem Raumpunkt nach dem Einschalten des Heizfolienpaars 3. Gemessene operative Temperatur des Sensors, berechnete operative Temperatur aus Daten des Klimamessgerätes und absolute Messabweichung als Funktion der Zeit nach dem Einschalten der Heizfolien.



**Bild 4:** Verlauf der Temperaturerhöhung  $\Delta T$  in einem Raumpunkt bei zwei Versuchen (nach dem Einschalten des Heizfolienpaars 3; nach dem Öffnen der Thermostatventile an den Heizkörpern A und B). Berechnete Änderung der operativen Temperatur des Sensors als Funktion der Zeit.



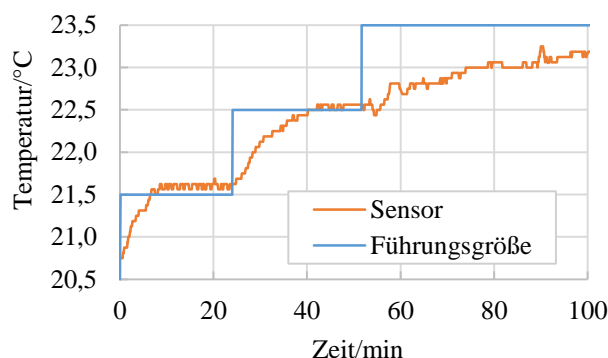
**Bild 5:** Verlauf der operativen Temperatur und des PMVs in einem Raumpunkt bei geregelten Heizfolienpaaren 3 und 10. Gemessene operative Temperatur des Sensors, vorgegebene Führungsgröße und vom Klimamessgerät berechneter PMV als Funktion der Zeit.

## 4.2 Regelung

Wir haben das Verhalten der Heizfolien und Heizkörper charakterisiert und daraus deren regelungstechnische Eigenschaften ermittelt, womit die Regelung ausgelegt werden konnte. Zur Regelung der operativen Temperatur wurde ein digitaler PI-Regler eingesetzt und dessen Verhalten bei einem Führungsgrößensprung von 21,5 °C auf 22,5 °C betrachtet (Wiederholung von Versuch 1 mit zwei geregelten Heizfolienpaaren, siehe **Bild 5**). Nach ca. 5 min betrug die Regeldifferenz nur noch 0,1 °C ohne Überschwingen. Im Verlauf des PMVs zeigt sich wieder die lange Einschwingzeit des Globethermometers. Die Verwendung als Messglied würde, aufgrund der Einschwingzeit von ca. 20 min, die Einschwingzeit des gesamten Regelkreises im Vergleich zum aufgebauten Sensor deutlich verlängern.

Zu Beginn des Versuchs 3 betrug die operative Temperatur lediglich 20,75 °C (siehe **Bild 6**), was bei typischen Raumklimaverhältnissen (Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s und relative Luftfeuchte 40 %) bei typischer Winterkleidung (Bekleidungsgrad 1 clo) und sitzender Tätigkeit (Aktivitätsgrad 1 met) zu einem etwas kühlen Empfinden der Umgebung führen sollte. Das wurde durch die Befragung der zwei Probanden bestätigt, die den Raum mit -1, also etwas kühl, bewerteten. Auch die Erhöhung der operativen Temperatur auf 21,5 °C empfanden die Probanden als etwas kühl. Erst bei 22,5 °C bewertete einer der Probanden die Behaglichkeit als neutral, wobei in Bodennähe eine spürbar niedrigere Temperatur herrschte. Die Abfrage am Ende des Versuchs ergab, dass sich die Probanden bei den erreichten 23,25 °C behaglich fühlten. Das entspricht mit den angenommenen Werten einem PMV von -0,08. Auch der Boden hatte sich nach 100 min spürbar erwärmt.

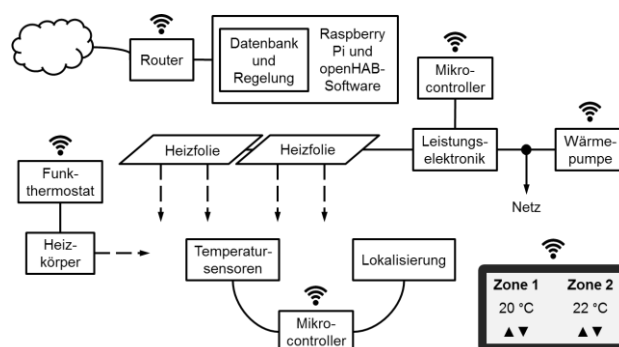
Allein durch die Änderung der operativen Temperatur konnte ein behagliches Raumklima erzeugt werden. Da in Altbauten typischerweise keine automatischen Lüftungsanlagen installiert sind, ist die Heizung die einzige Möglichkeit das Raumklima automatisch zu regeln, was mit unserem System gut funktioniert.



**Bild 6:** Verlauf der operativen Temperatur in einem Raumpunkt bei geregelten Heizfolienpaaren 3 und 10. Gemessene operative Temperatur des Sensors und vorgegebene Führungsgrößensprünge als Funktion der Zeit.

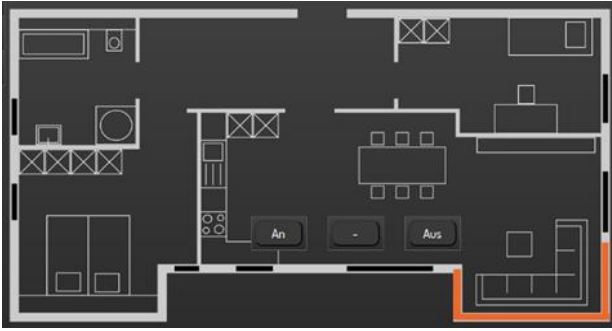
## 4.3 Architektur und Benutzerschnittstelle

Die in den vorherigen Abschnitten geschilderten Anforderungen und Gegebenheiten des aktuellen Stands der Technik ließen nach einer Evaluationsphase für die Wahl der Middleware die Entscheidung seitens des Integrations-teams auf openHAB fallen. Die Plattform ist modular aufgebaut, als Open-Source-Software einseh- und adaptierbar und ermöglicht folglich eine flexible HMI-Gestaltung. Des Weiteren werden verschiedene Kommunikationsprotokolle von openHAB unterstützt. Demnach erfüllt die Plattform alle relevanten Anforderungen. Der digitale Regler, die Datenbank für MQTT und openHAB werden auf einem Raspberry Pi betrieben. **Bild 7** skizziert die Architektur. Für den Nutzer sind die Temperaturen, der Ein/Aus-Zustand der Heizfolien (siehe **Bild 8**), die Temperatur in- und außerhalb der Wohnung und die Luftfeuchtigkeit relevant. Ebenfalls ist die Zieltemperatur anzuzeigen, die der Nutzer anpassen kann. Es empfiehlt sich grundsätzlich die Darstellung in Form eines Grundrisses, welcher für den Feldtest angefertigt wird.



**Bild 7:** Systemarchitektur des Projekts. Auf dem Raspberry Pi befinden sich die openHAB-Software und die Datenhaltung.





**Bild 8:** Grundriss der Wohnung mit den orange hervorgehobenen eingeschalteten Heizfolien.

#### 4.4 Nutzeranforderungen

Generell soll eine breite Zielgruppe an Benutzern angesprochen werden: Bewohner von Häusern, Wohnungen und weiteren Wohnformen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Nutzer nicht automatisch auch die Käufer des neuen Systems sind. Wenn es allerdings um die thermische Behaglichkeit bzw. um die Akzeptanz des Systems in der Nutzung geht, sind für die Behaglichkeitsstudien und Usability Tests nur die Benutzer von Interesse. Durch Literaturrecherchen ist der hohe Stellenwert der thermischen Behaglichkeit bereits bekannt [2]. Umso mehr erstaunte es, dass bei den durchgeführten Interviews (N=22) mehr als 80 % angeben, sie würden häufig an bestimmten Körperstellen frieren. Auf die Frage, wie die Temperatur in den einzelnen Räumen (Badezimmer, Wohnzimmer, Schlafzimmer und Küche) empfunden wird, geben für jeden Raum mindestens 60 % der Befragten an, die Temperatur sei angenehm. Vor dem Hintergrund, dass es sich um eine kleine, nicht repräsentative Stichprobe handelt, kann man daraus zwar keine allgemeingültigen Schlüsse ziehen, jedoch stellt sich ein interessanter Aspekt dar. Nachgefragt bei den Probanden, geben diese an, dass eine höhere Raumtemperatur nichts an den kalten Körperstellen ändere, jedoch die Luftqualität durch eine höhere Grundtemperatur leide, was sich wiederum auf die Behaglichkeit auswirke. Es zeigt sich, dass das gezielte Heizen bestimmter Körperregionen den Bedürfnissen von Nutzern eher entsprechen könnte als eine allgemeine Raumlufttemperaturerhöhung. Ob dies tatsächlich der Fall ist, wird in dem Feldtest zu evaluieren sein.

### 5 Diskussion und Ausblick

Ausgehend von den Vorversuchen wird in einem Feldtest evaluiert werden, ob die erhaltenen Daten mit dem Behaglichkeitsempfinden über einen längeren Zeitraum hinweg und mit dem einer größeren Anzahl an Probanden übereinstimmen. Es ist geplant, in einer Versuchswohnung mehrere Räume mit den Heizfolien auszustatten und so zu testen, wie die Heizfolien, die Wärmepumpe und die Stellantriebe der Heizkörper betrieben werden müssen, um die thermische Behaglichkeit, möglichst energieeffizient zu sichern.

Bei den Behaglichkeitsstudien ist darauf zu achten, dass die Bedingungen bei allen Probanden dieselben sind und die Probanden in etwa den gleichen Isolationswert der Bekleidungskombination aufweisen [14]. In Anlehnung an [28] kann die unmittelbare subjektive Bewertung durch die Nutzer für eine Gesamtbewertung des Raumklimas verwendet werden. Dazu sind Bewertungen durch das Ausfüllen von Fragebögen zur allgemeinen Akzeptanz des Raumklimas, zum thermischen Empfinden und zur wahrgenommenen Luftqualität durchzuführen.

### 6 Literatur

- [1] Bischof, W.; Hellwig, R. T.; Brasche, S.: Thermischer Komfort – die extraphysikalischen Aspekte. *Bauphysik* 29 (2007) 3, S. 208–212.
- [2] Völker, C.; Beckmann, J.; Kornadt, O.: Ergebnisse einer Großstudie über Nutzeranforderungen an Wohngebäude. *Bauphysik* 33 (2011) 3, S. 167–176.
- [3] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2014, 2014.
- [4] Michl, M. et al.: Potentialanalyse selbstlernender Einzelraumtemperaturregelungen zum energieeffizienten Heizen. In: *Tagungsband zum 2. Green Factory Bavaria Kolloquium 2015*. S. 436–449.
- [5] Bürner, J.; Franke, J.: Elektrische Speicherheizungen als Instrument zur elektrischen Lastverschiebung. In: *HLH Bd. 67* (2016), Nr. 1, S. 32–34.
- [6] Bauer, J. et al.: Die intelligente Wohnung als Baustein im Internet der Dinge. In: *1. transdisziplinäre Konferenz zum Thema „technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“*, Hamburg: Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut Schmidt Universität, 2014.
- [7] Dickmann, G.: DigitalSTROM®: A centralized PLC topology for home automation and energy management. In: *Power Line Communications and Its Applications, IEEE International Symposium on*, 2011, pp. 352–357.
- [8] Pätz, C.: *Z-Wave: Die Funktechnologie für das Smart Home*. Norderstedt: Books on Demand, 2014.
- [9] Kreuzer, K.; Eichstädt-Engelen, T.: *openHAB: Automatisiertes Heim – Teil 1*. Frankfurt am Main: entwickler.press, 2015.
- [10] Bauer, J.; Kettschau, A.; Franke, J.: Optimierung der Datenvisualisierung von AAL-Serviceplattformen durch Usability-Tests. In: *7. Deutscher AAL-Kongress*, Berlin: VDE Verlag GmbH, 2014.
- [11] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Hg.: *Deutsche Normungs-Roadmap: Smart Home + Building*, Frankfurt am Main, 2015.
- [12] Nobel, D. et al.: *Eclipse SmartHome und Smart Office: Intelligente Lösungen in der Heimautomation*. Frankfurt am Main: entwickler.press, 2015.
- [13] Willems, W.; Dinter, S.; Schild, K.: *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1*. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2006.

- [14] N. N.: DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung, Mai 2006.
- [15] Nicol, F.; Humphreys, M.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 6, 2002, pp. 563–572.
- [16] Nicol, F.; Humphreys, M.: Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Building and Environment*, vol. 45, no. 1, 2010, pp. 11–17.
- [17] Kane, T; Firth, S. K.; Lomas, K. J.: How are UK homes heated?: A city-wide, socio-technical survey and implications for energy modelling. *Energy and Buildings*, vol. 86, 2015, pp. 817–832.
- [18] Beizaee, A. et al.: Measuring the potential of zonal space heating controls to reduce energy use in UK homes: The case of un-furnished 1930s dwellings. *Energy and Buildings*, vol. 92, 2015, pp. 29–44.
- [19] Ekwevugbe, T. et al.: Real-time building occupancy sensing using neural-network based sensor network. In: *7th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, 2013, pp. 114–119.
- [20] Grolinger, K. et al.: Energy Forecasting for Event Venues: Big Data and Prediction Accuracy. *Energy and Buildings*, vol. 112, 2016, pp. 222–233.
- [21] Simone, A. et al.: Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems. In: *Proc. 9th REHVA World Congress Clima 2007 “WellBeing Indoors”*, Helsinki, (8 p.), 10.–14. Juni 2007.
- [22] Michl, M. et al.: Von der Industrie 4.0 zur Wohnung 4.0 – Einsatzpotenziale verteilter Systemansätze im industriellen und privaten Umfeld. *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (1), S. 63–67, 2015.
- [23] N. N.: DIN EN ISO 9241-210:2011-01: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Januar 2011.
- [24] Häußling, R.: *Techniksoziologie*. UTB. Baden-Baden: Nomos 2014.
- [25] Moser, C.: *User Experience Design. Mit erlebniszentrierter Softwareentwicklung zu Produkten, die begeistern*. Berlin: Springer 2012.
- [26] Gossauer, E.: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden – eine Feldstudie. Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz*, TH Karlsruhe, 2008.
- [27] Röther, U.; Kappert, M.: *Energieeffizienz im Alltag? Ansätze zur Berücksichtigung von Nutzerbedürfnissen und Nutzerverhalten in Gebäudeplanung und -betrieb*. VDI Bericht (2043), 2008, S. 137–150.
- [28] N. N.: DIN EN 15251:2007: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, 2007.