

Sensorlösungen für eine energieeffiziente nutzerzentrierte Heizung

*Moritz Hein¹, Ralf Stöber¹, Michael Meiler¹, Daniel Schaller¹,
Rebecca Zehle¹, Gerhard Fischerauer¹, Martin Feller²*

¹ Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik sowie Zentrum für Energietechnik (ZET), Universität Bayreuth, 95 440 Bayreuth, Germany

² Fa. Frenzelit Werke GmbH, Frankenhammer, 95460 Bad Berneck, Germany

Zusammenfassung

Im Gegensatz zu konventionellen Heizungen, bei denen der gesamte Raum über die Konvektion der Luft erwärmt wird, beruht ein alternativer Ansatz auf infrarot (IR) strahlenden Heizfolien. Diese sind an der Raumhüllfläche, hier an Wänden und der Decke, angebracht. Die unabhängig voneinander stellbaren Heizfolien ermöglichen das Aufteilen eines Raumes in mehrere Heizzonen. Nur in den Zonen, in denen sich eine Person aufhält, soll ein behagliches Punktklima erzeugt werden. Der Rest des Raumes wird auf einer niedrigeren Grundtemperatur gehalten. Daraus ergeben sich die Randbedingungen für das Messsystem. Erstens muss erkannt werden, ob sich Personen in einer der Heizzonen aufhalten, und zweitens muss die vermeintliche Behaglichkeit von Personen an relevanten Punkten im Raum bestimmt werden. Für die erste Aufgabe haben wir verschiedene Sensortypen zur Personenerfassung unter Berücksichtigung der Anonymität von Personen untersucht und bewertet. Für die zweite Aufgabe wurde der Umstand ausgenutzt, dass die thermische Behaglichkeit am stärksten von der Empfindungs- oder operativen Temperatur abhängt [1–3]. Für deren Messung wurde ein flacher, einfach produzierbarer Sensor nach [4] aufgebaut und in ein Funknetzwerk integriert. Die Infrastruktur des Messsystems besteht aus Mikrocontroller-Boards mit WLAN-Funktionalität, einem WLAN-fähigen Router und einem Datenbank-Server, mit dem die Messdaten im Netzwerk bereitgestellt werden.

Keywords: Heizsystem, Personenlokalisierung, thermische Behaglichkeit, Funksensornetzwerk

Einleitung

Große Teile des Gebäudebestands in Deutschland und anderen europäischen Ländern sind Altbauten mit zentralen Warmwasserheizungen und angeschlossenen Heizkörpern. Aufgrund der ungenügenden Gebäudeisolation und den Leitungsverlusten durch den Transport des Warmwassers ist die Energiebilanz relativ schlecht. Das typische Heizverhalten der Bewohner verstärkt den negativen Effekt: der Thermostat wird üblicherweise unabhängig von der Anwesenheit von Personen eingestellt, so dass über den gesamten Tag eine konstante Raumtemperatur vorherrscht. Dieses Verhalten führt zu einem erhöhten Energieverbrauch, da die Wärmeverluste mit der Raumtemperatur steigen. Die Effizienz ließe sich durch eine Sanierung der Gebäudeisolation oder einen Austausch der Heizkörper durch Flächenheizungen und einer neuen Zentralheizung verbessern, jedoch sind die Investitionskosten bei derartigen Maßnahmen, vor allem bei Mehrfamilienhäusern, hoch. Abhilfe schafft ein sukzessiv nachrüstbares Heizsystem, das die Vorteile einer

Luft-/Wasserwärmepumpe mit denen einer elektrischen Flächenheizung kombiniert.

Heizsystem

Normalerweise würden die hohen Vorlauftemperaturen, die von bestehenden Heizkörpern benötigt werden, den Einsatz von Wärmepumpen bei der Sanierung von Altbauten ausschließen. Kombiniert man jedoch die wärmepumpengespeiste Warmwasserheizung mit einer elektrisch betriebenen, infrarot (IR) strahlenden Flächenheizung, ist ein positiver Effekt auf die Energiebilanz des Heizsystems zu erwarten. Der zusätzliche Wärmeeintrag durch die Flächenheizung ermöglicht eine Absenkung der Vorlauftemperatur der Heizkörper, was sich positiv auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe auswirkt. Der Teil der konvektiv eingebrachten Wärme wird somit reduziert und von an Decken und Wänden angebrachten Flächenheizungen ersetzt.

Die Flächenheizung besteht aus einer 0,4 mm dicken PET-Folie mit eingearbeiteten Carbonfasern, die, elektrisch gesehen, einen niederohmigen Widerstand darstellt. Der Stromfluss

durch diesen Widerstand erwärmt die Oberfläche, was zu einer IR-Strahlenemission führt, die wiederum im Sichtfeld befindliche Objekte erwärmt. Dadurch wird die Wärme schneller auf den zu erwärmenden Körper übertragen, und der Anteil der Energie, der zur Erwärmung der Luft verloren geht, wird reduziert.

Um eine Verbesserung der Energieeffizienz zu erzielen, ist ein erhöhter Aufwand bei der Temperaturregelung notwendig. Die einzelnen Heizfolien müssen derart betrieben werden, dass dort, wo sich Personen aufhalten, möglichst schnell ein behagliches Punktklima erzeugt wird. Wir haben Aspekte eines in diesem Kontext geeigneten Messsystems untersucht.

Personenlokalisierung

Für die Personenlokalisierung in einer Heizzone stehen prinzipiell eine Reihe von Sensoren zur Verfügung. Im gegebenen Rahmen ist dabei aus Gründen der Privatsphäre und des Datenschutzes eine wichtige Randbedingung, dass Personen bei der Anwesenheitserfassung nicht identifiziert werden können. Aus diesem Grund scheiden bilderzeugende und -verarbeitende Systeme wie Kameras aus. Strahlende Sensoren wie Radar- oder Ultraschall-Sensoren wären zwar technisch geeignet, aber die Akzeptanz im Wohnumfeld darf zumindest im ersten Fall bezweifelt werden.

Unser Fokus lag daher auf passiven Sensoren wie pyroelektrischen Infrarotsensoren (PIR), Thermosäulen, Thermosäulenarrays und CO₂-Sensoren. Sie eignen sich unterschiedlich gut zur anonymen Personenlokalisierung, wobei sich die Thermosäulen als am besten geeignet darstellten. Die pyroelektrischen Sensoren sind nur eingeschränkt einsetzbar, da sie ausschließlich Änderung der Wärmestrahlung detektieren. Eine sich bewegende Person ist so zwar feststellbar, jedoch keine ruhenden Personen. CO₂-Sensoren können das ausgeatmete CO₂ anwesender Personen detektieren. Dies erfolgt aber bereits in kleinen Räumen so träge, dass sie für unseren Anwendungsfall nicht in Frage kommen. Daher wurden alle anschließenden Versuche mit dem Thermosäulenarray Omron D6T-44L-06 [5] durchgeführt. Die auf Infrarotstrahlen beruhende Messmethodik ermöglicht eine berührungslose Überwachung eines bestimmten Bereiches im Raum.

Eine beispielhafte Anordnung der Sensoren für ein möglichst großes Sichtfeld und zuverlässige Erkennung wurde bereits in [6] beschrieben. Hierbei wurden vier Sensoren quadratisch angebracht um eine Auflösung von 8x8 Pixeln zu erzielen. Unter der Annahme, ein Mensch fülle maximal eine Fläche von 3x3 Pixeln, wurde

seine Position bestimmt. Für eine genaue Lokalisierung innerhalb eines Raums sind also mehrere Arrays nötig. Das Hauptaugenmerk liegt im Folgenden auf der Präsenzerkennung in einer Heizzone, wofür lediglich ein Sensor benötigt wird.

Ausgehend von Methoden der Bildverarbeitung [7] werden die Daten des Sensors, wie das Thermosäulenarray selbst, in einer 4x4-Matrix **D** angeordnet. Anschließend werden aus den Werten das Maximum und das Minimum ermittelt. Der Algorithmus, der entscheiden soll, ob eine Person anwesend ist, basiert dabei auf folgenden Prämissen:

1. Das ermittelte Maximum darf nicht größer als 34 °C sein. Kein menschlicher Körper hat eine höhere Oberflächentemperatur.
2. Das ermittelte Minimum muss im Bereich der Temperatur der Raumhüllfläche liegen, da sonst keine Unterscheidung zwischen Mensch und anderen wärmestrahlenden Objekten im Raum möglich ist.
3. Das Maximum ist um mindestens 2 °C größer als das Minimum, um Rauschen zu unterdrücken.

Im nächsten Schritt wird eine 3x3-Maske **M** über das Maximum gelegt und die umliegenden Werte verglichen (siehe Abb. 1). Bei genügend hoher, aber nicht zu großer, Abweichung des Wertes vom Maximum, steigt die Wahrscheinlichkeit für die Anwesenheit einer Person. Befinden sich die Werte zweier oder mehrerer Pixel innerhalb dieses Temperaturfensters, gilt eine Person als erkannt.

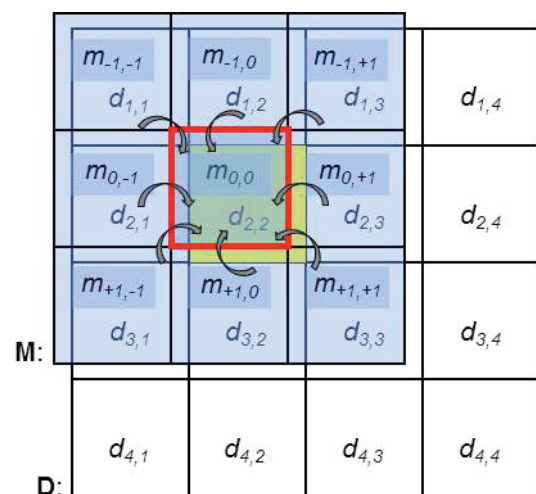


Abb. 1: Dynamisches Sammeln der umliegenden Werte mit der Maske **M** über der Datenmatrix **D**; Maximum im Pixel $d_{2,2}$ (gelb).

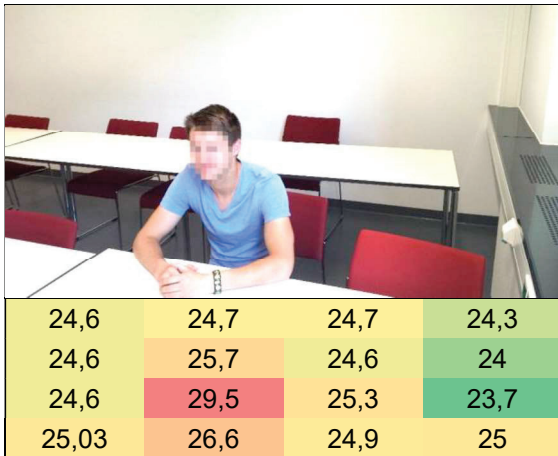


Abb. 2: Versuch mit einer sitzenden Person; Werte des, auf die Person gerichteten, 4x4 Thermosäulenarrays in °C.

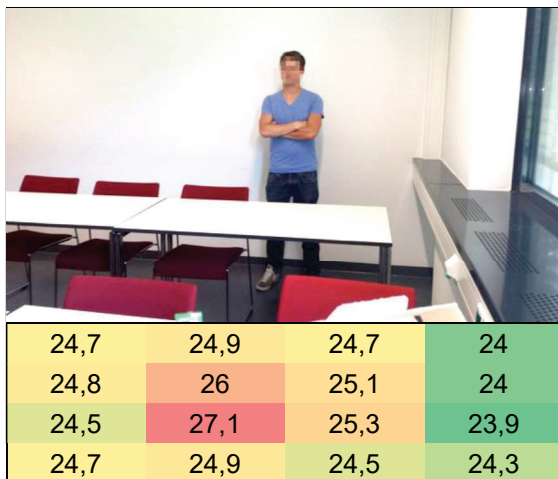


Abb. 3: Versuch mit einer stehenden Person; Werte des, auf die Person gerichteten, 4x4 Thermosäulenarrays in °C.

Tab. 1: Ausgabedatei des Gruppenversuchs mit sechs Personen

Reihe	Spalte	Wert/°C	Anwesenheit
3	2	29,1	1
3	2	29,2	1
3	2	29,3	1
1	2	19,4	0
2	1	23,9	0
4	1	24,0	0

Um die Funktion des Algorithmus zu überprüfen, wurden zunächst Versuche mit einer Person in unterschiedlichen Abständen vom Sensor durchgeführt. Trotz hoher Außentemperatur von ca. 30 °C wurde die Person zuverlässig erkannt (siehe Abb. 2 und 3).

Ebenfalls wurden Messungen an größeren Gruppen von Personen durchgeführt. Auch diese wurden vom Sensor zuverlässig als Personen erkannt, was die logische „1“ in der Spalte „Anwesenheit“ der Tabelle 1 bestätigt.

Bei der Personenerkennung in Haushalten muss darüber hinaus auf diverse Störquellen geachtet werden. So könnten Haustiere oder andere Strahlungsquellen, wie z.B. ein Wasserkocher, fälschlicherweise als Personen wahrgenommen werden und die Regelung aktivieren. Hierfür wurden Versuche durchgeführt, um die Empfindlichkeit des Algorithmus zu überprüfen.

Die Schwierigkeit besteht dabei darin, dass sich die Felltemperatur von Tieren kaum von der Oberflächentemperatur der Kleidung unterscheidet. Lediglich die Hauttemperatur mit 34 °C macht einen großen Unterschied zur Oberflächentemperatur von 26 °C aus. Kleinere Tiere als Katzen wurden vom Algorithmus nicht als Person eingeschätzt. Katzen und Hunde mit kurzem Fell, und somit höherer Oberflächentemperatur, allerdings schon. Auch bei Versuchen, bei denen sich die Tieren vom Sensor weg bzw. auf ihn zu bewegten, hat der Algorithmus immer fälschlicherweise angenommen, dass es sich um eine Person handele. Ein Hund mit 60 cm Stockmaß und sehr langem Fell verursachte aufgrund der niedrigeren Oberflächentemperatur nur selten ein falsch positives Ergebnis. Die anderen Störquellen, wie z. B. Wasserkocher, Bildschirme oder auch von der Sonne angestrahlte Fensterreihen ergaben keine Fehleinschätzung. Allerdings wurde auch festgestellt, dass der Algorithmus nur selten ein Kind (vier Jahre alt) erkennt.

Für die Erfassung von erwachsenen Personen ist der Sensor in Verbindung mit dem Algorithmus gut geeignet. Damit auch Kinder zuverlässig erkannt werden, muss das Messsystem um, beispielsweise, einen PIR-Sensor erweitert und mittels Sensordatenfusion mit den Werten des Thermosäulenarrays verknüpft werden. Allerdings steigt dadurch die Wahrscheinlichkeit eines falsch positiven Ergebnisses, wenn Tiere das Sichtfeld der Sensoren betreten.

Behaglichkeitsmessung

Das Ziel einer personenzentrierten Heizung ist das subjektive Wärmeempfinden von Personen (ihr Behaglichkeitsgefühl). Dieses Empfinden muss folglich aus technisch messbaren Größen geschätzt werden [8]. Dafür hat sich der Behaglichkeitskoeffizient (*Predicted Mean Vote*, PMV) etabliert [2]. Als Alternative zur zeitintensiven Berechnung des PMV aus schlecht messbaren Größen (Bekleidungsgrad und Aktivitätsgrad) haben wir die Empfindungs- oder operative

Temperatur als mögliche Regelgröße betrachtet. Dies entspricht dem *Adaptive Comfort Standard* (ACS), bei dem anhand der Außentemperatur jener Bereich der operativen Temperatur berechnet wird, in dem sich 80 bis 90 % der Personen wohl fühlen [3].

Die operative Temperatur kann mit einem Klimamessgerät bestimmt werden; wir benutzen den Typ Testo 480, der Luft- und Globetemperatur, Luftfeuchte und -geschwindigkeit misst. Die operative Temperatur T_O stellt bei Luftgeschwindigkeiten $v \leq 0,1 \text{ m/s}$ das arithmetische Mittel aus der Lufttemperatur T_L und der mittleren Strahlungstemperatur T_S dar. Die Strahlungstemperatur berechnet der Hersteller des Klimamessgeräts wie folgt nach der ISO-Norm 7726 [9]:

$$T_S = \left[(T_G + 273)^4 + k \cdot (T_G - T_L)^{0,25} \right] - 273,$$

$$k = \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v^{0,6}}{\varepsilon_G \cdot d_G^{0,4}}.$$

Dabei bedeuten:

T_S : normierte Strahlungstemperatur (Bezugswert, auch bei T_G und T_L : 1 °C);

T_G : normierte Globetemperatur;

T_L : normierte Lufttemperatur;

v : normierte Luftgeschwindigkeit (Bezugswert: 1 m/s)

ε_G : Emissionskoeffizient des Globethermometers ($\varepsilon_G = 0,95$);

d_G : normierter Durchmesser des Globethermometers (= 0,15; Bezugswert: 1 m).

Für den praktischen Einsatz in einer Wohnumgebung eignet sich dieses Messgerät freilich schon aus Kostengründen nicht. Als feldtauglicher Ersatz wurde, wie von Simone et al. [4] vorgeschlagen, ein runder, flacher Temperatursensor mit 30 mm Durchmesser untersucht (Abb. 4). Bei Versuchen in einem, mit den zehn Heizfolienpaaren 1–10 ausgestatteten, ca. 40 m² großen Raum (Abb. 5) lieferte dieser Sensor im stationären Betrieb (bei konstanter Temperatur) nahezu dasselbe Ergebnis wie die operative Temperatur, die aus den Ausgangsdaten des Klimamessgeräts berechnet wurde. Bei dynamischen Tests (Einschalten eines Heizfolienpaars und Verfolgen des transienten Aufheizvorgangs) reagierte der Temperatursensor wegen seiner kleineren thermischen Masse, und damit kürzeren Einschwingzeit, schneller als das Klimamessgerät (Abb. 6). Der Abbildung 6 entnimmt man auch eine Zeitkon-

stante von 10 bis 20 min für den Aufheizvorgang. Dies ist typisch und muss bei der Temperaturregelung berücksichtigt werden.

Zur Charakterisierung der Heizfolien wurde anschließend untersucht, ob sich die Ergebnisse aus den Einzelmessungen additiv verhalten, wenn zum Vergleich mehrere Heizfolienpaare gleichzeitig betrieben werden (Abb. 7). Die Differenz zwischen den addierten Einzelmessungen zweier Heizfolienpaare und der Gesamtmessung betrug weniger als 0,5 °C, woraus folgt, dass aus den Eigenschaften der einzelnen Heizfolienpaare auf das Gesamtsystem geschlossen werden kann.

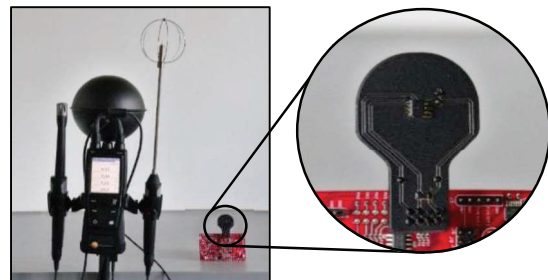


Abb. 4: Links Klimamessgerät Testo 480 mit den Sonden zur Messung von Lufttemperatur und -feuchte, Globetemperatur (schwarz gefärbte Kupferkugel mit Einschwingzeit von ca. 20 min) und Luftgeschwindigkeit (v. l. n. r.); rechts Sensor auf Mikrocontroller-Board.

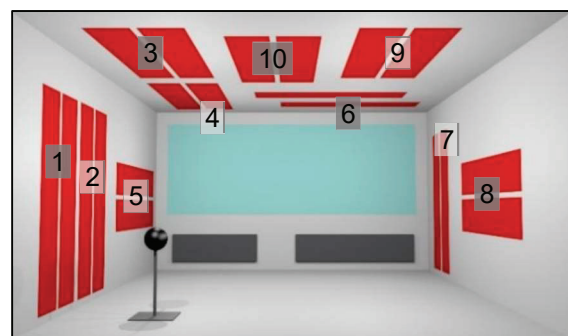


Abb. 5: Anordnung der Heizfolien im Raum (rot); die schwarze Kugel repräsentiert die Position des Globethermometers bzw. des einzelnen Temperatursensors.

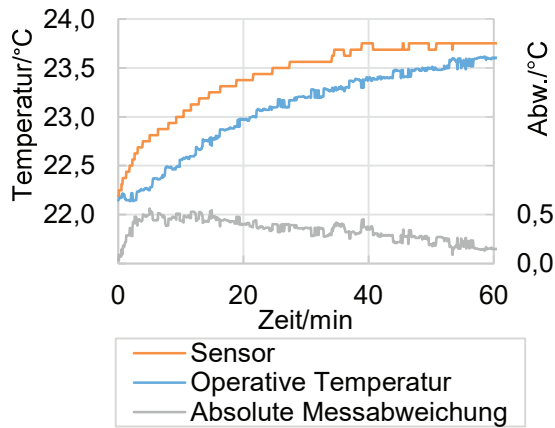


Abb. 6: Dynamische Tests zur Untersuchung des transienten Verlaufs der operativen Temperatur in einem Raumpunkt nach dem Einschalten des Heizfolienpaares 1. Gemessene Temperaturen (Klimamessgerät, Einzelsensor und Differenz) als Funktion der Zeit nach dem Einschalten der Heizfolien.

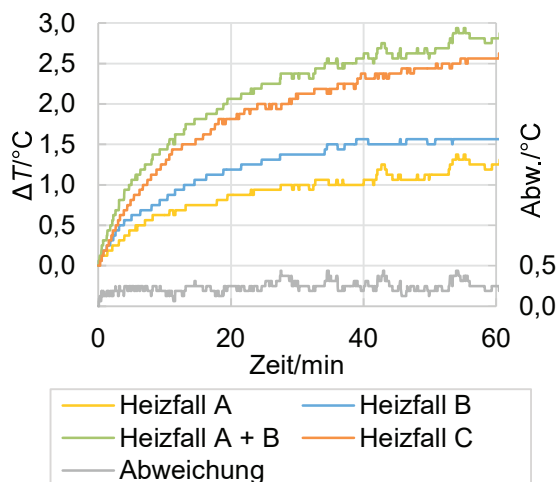


Abb. 7: Vergleich der Temperaturänderung bei Heizfall A (Heizfolienpaar 3), B (Paar 1) und der Addition von Heizfall A + B mit Heizfall C (Paare 1 und 3).

Zur Auslegung der Regelung wurde das Zeitverhalten der Heizfolien charakterisiert. Zur Regelung der operativen Temperatur wurde ein digitaler PI-Regler eingesetzt und dessen Verhalten bei einem Führungsgrößenprung von 21,5 °C auf 22,5 °C betrachtet (Abb. 8). 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.

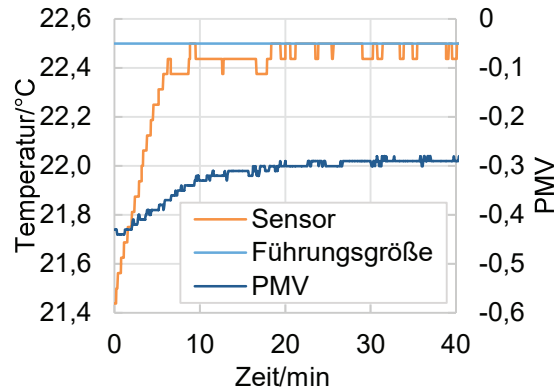


Abb. 8: Verlauf der operativen Temperatur und des PMVs in einem Raumpunkt bei geregelten Heizfolienpaaren 3 und 10. Gemessene operative Temperatur des Sensors, vorgegebene Führungsgröße und vom Klimamessgerät berechneter PMV als Funktion der Zeit.

Funksensornetzwerk

Eine intelligente Raumklimaregelung wird mehrere Temperatursensoren und Personenlokalisatoren umfassen müssen, was aber kostenmäßig mit den beschriebenen Sensoren darstellbar ist. Das Grundgerüst des gesamten Messsystems bildet ein Funksensornetzwerk (Abb. 9). Für die Kommunikation im Netzwerk wurde das Protokoll MQTT (*MQ Telemetry Transport*) ausgewählt, das ein dynamisches Wachsen des Netzwerks erlaubt und darauf ausgerichtet ist, möglichst wenig Energie zur Datenübertragung zu verbrauchen.

Die Sensorknoten veröffentlichen ihre Messdaten innerhalb des Netzwerks unter funktions- und ortsabhängigen Themen. Ein Datenbank-Server empfängt die Daten und stellt sie anderen Instanzen, die dem entsprechenden Thema beigetreten sind, bereit. Das Netzwerk wurde aus kostengünstigen Komponenten zusammengestellt: einem handelsüblichen WLAN-Router, einem Einplatinencomputer Raspberry Pi 2 als MQTT-Broker und WLAN-fähigen

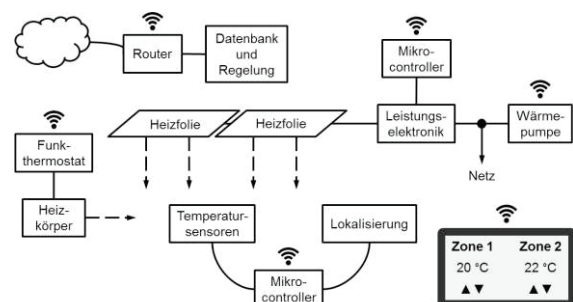


Abb. 9: Infrastruktur des Heizsystems.

Mikrocontroller-Boards TI CC3200 LaunchPad für die Sensorknoten und die Steller der Heizfolien.

Der digitale Regler ist ebenfalls auf dem Raspberry Pi implementiert. Nach dem Empfangen der Sensordaten wird die Reglerausgangsgröße berechnet und mittels MQTT-Protokoll veröffentlicht. Die mit der Leistungselektronik der Heizfolien verbundenen Mikrocontroller erhalten die Reglerausgangsgröße und errechnen daraus die Pulsweite als Stellbefehl für die Pulsweitenmodulation der Leistungselektronik. Die Einstellung der Führungsgröße erfolgt über ein Programm für Android, mit dem die Führungsgröße wiederum unter einem MQTT-Thema veröffentlicht wird.

Fazit und Ausblick

Wir haben einen Sensor zum Erfassen der operativen Temperatur untersucht und in ein Funk-sensornetzwerk integriert. Nach der Charakterisierung der Heizfolien haben wir die Regelung ausgelegt und deren Verhalten bei einer Führungsgrößenänderung betrachtet. Außerdem wurde ein Thermosäulenarray auf dessen Fähigkeit Personen in einer Heizzone zu detektieren untersucht. In einem Feldtest wird das kombinierte Heizsystem nun in einer Versuchswohnung installiert und das Mess- und Regelungssystem auf Behaglichkeit und Energieeffizienz optimiert.

Literaturnachweis

- [1] B. Li et al., „Physiological Expression of Human Thermal Comfort to Indoor Operative Temperature in the Non-HVAC Environment“, *Indoor and Built Environment*, Vol. 19, No. 2, S. 221–229, Apr. 2010; doi: 10.1177/1420326X10365213
- [2] N.N., DIN EN ISO 7730:2006-05, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“, Mai 2006
- [3] R. de Dear und G. Brager, „Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55“, *Energy and Buildings*, Vol. 34, No. 6, S. 549–561, Juli 2002; doi:10.1016/S0378-7788(02)00005-1
- [4] A. Simone et al., „Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems“, *Proc. 9th REHVA World Congress Clima 2007 "WellBeing Indoors"*, Helsinki, (8 S.), 10.–14. Juni 2007
- [5] OMRON Corporation. Firmenschrift: Datenblatt D6T – MEMS Thermal Sensors. (Zuletzt abgerufen am: 25.2.2016) <http://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-d6t.pdf>
- [6] M. Kuki et al., „Mining Multi Human Locations Using Thermopile Array Sensors“, *IEEE 43rd*

International Symposium on Multiple-Valued Logic, Toyama, S. 59–64, Mai 2013; doi: 10.1109/ISMVL.2013.38

- [7] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*, 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012; doi: 10.1007/978-3-642-04952-1
- [8] A. Aswani et al., „Reducing Transient and Steady State Electricity Consumption in HVAC Using Learning-Based Model-Predictive Control“, *Proc. IEEE*, Vol. 100, No. 1, S. 240–253, Jan. 2012; doi: 10.1109/JPROC.2011.2161242
- [9] N.N., ISO 7726:1998, „Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities“, 1998