

# Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden

Üblicherweise speisen Gebäude mit Photovoltaikanlagen einen Großteil des Ertrags in das öffentliche Stromnetz ein. Um den Eigenverbrauch zu erhöhen, bietet es sich bei gut gedämmten Gebäuden an, die Laufzeit der Wärmepumpe auf die Tageszeit zu limitieren. Dabei muss der thermische Komfort gewährleistet bleiben. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes auf die operativen Temperaturen in Abhängigkeit von verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe mit einer thermischen Gebäudesimulation untersucht und mit Messwerten von einem kleinen Mehrfamilienhaus validiert. Es wird gezeigt, dass auch bei einem sehr gut gedämmten Gebäude eine mittlere bis hohe Wärmespeicherfähigkeit vorhanden sein muss, damit die Laufzeit der Wärmepumpe ohne Komforteinbuße auf die Tagesstunden limitiert werden kann. Mit einem Leichtbau ist die gewählte Strategie nicht möglich. Die lange tägliche Sperrzeit bedingt, dass gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb die operative Temperatur größeren Schwankungen unterworfen ist. Das Niveau und die Breite des zulässigen Temperaturbandes müssen mit den normativen Anforderungen für die Behaglichkeit abgestimmt sein. Die Diskussion über normative Behaglichkeitsanforderungen versus energetische Flexibilität des Gebäudes muss lanciert werden.

**Influence of thermal mass on the energy flexibility of buildings.**  
*Usually Buildings with photovoltaic systems feed a large amount of electricity into the public grid. Shifting duty cycles of the heat pump into the daytime would therefore be a possible means to greatly increase the self-consumption of a well isolated building. However, thermal comfort should not deteriorate. The impact of the thermal capacity of the construction and the limitations of reducing heat pump run-times on operative temperatures are investigated by transient thermal building simulation. The simulation is validated with monitored data from a small residential building.*

*The results obtained show that a well insulated building must have a middle or high thermal capacity to be able to limit the run-time of the heat pump to daytime without incurring a non-negligible loss of thermal comfort. The run-time limitation proves to not be possible with a lightweight construction (low thermal capacity). Due to the long daily intervals without heat input, the fluctuation of the operative temperature is higher than with continuous heat pump operation. The level and fluctuation width of the operative temperatures should be in accordance with requirements from comfort standards. Results from the work described herein clearly show that a discussion about requirements in comfort standards versus energy flexibility of buildings must be initiated.*

## 1 Einführung 1.1 Hintergründe

Durch den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien wird die Menge an naturgemäß stark fluktuierender Einspeisung von Sonnen- und Windenergie in das öffentliche Stromnetz künftig noch zunehmen. Dies führt hinsichtlich der Netzstabilität und der Netzkapazität zu großen Herausforderungen.

Um das Netz zu entlasten ist es sinnvoll, Strom direkt dort zu verbrauchen, wo er produziert wird oder lokal für den Verbrauch zu einem späteren Zeitpunkt zu speichern. Das heißt zum Beispiel, dass die Netzeinspeisung von dezentralen Photovoltaikanlagen durch sofortigen Eigenverbrauch bzw. lokale Speicherung reduziert werden soll. Damit am Gebäude ein möglichst hoher Eigenverbrauch entsteht, muss das Gebäude entsprechend flexibel reagieren können. Diese energetische Flexibilität beruht auf einem lokalen Lastmanagement für beeinflussbare Verbraucher und entsprechenden Möglichkeiten zur Speicherung. Um die Akzeptanz zu gewährleisten, darf die Flexibilität die Lebensweise und den Komfort des Nutzers jedoch nicht maßgeblich einschränken.

Bei einem Monitoring von einem kleinen Mehrfamilienhaus [1] haben die Messwerte gezeigt, dass in dem Zeitraum von September 2011 bis April 2012 die Gleichzeitigkeit von Verbrauch und Ertrag in dem täglichen Zeitfenster zwischen 10 und 16 Uhr bei ca. 28 % liegt. Außerhalb dieses Zeitfensters ist der größte Bezieher die Wärmepumpe mit einem Anteil von ca. 27 %. Dies legt nahe, dass eine Laufzeitverschiebung der Wärmepumpe in die Tagesstunden die Gleichzeitigkeit erhöhen kann. Das heißt, die Eigendeckung wird gesteigert und die Interaktion mit dem Netz entsprechend reduziert. Im Februar 2013 wurde die Wärmepumpenlaufzeit am Gebäude für den Betrieb von Heizung und Warmwasser auf 10–19 Uhr limitiert. Dadurch wurden im Winter 2013/2014 etwa 1 000 kWh Stromverbrauch aus den Abend- und Nachtstunden in die Tagesstunden verschoben. Dies führte einerseits zu einer Erhöhung der Gleichzeitigkeit von 21 % (Heizperiode 2011/2012, nachfragegeführter Betrieb) auf 34 % (Heizperiode 2013/2014, Gleichzeitigkeit optimierter Betrieb) und andererseits zur Verbesserung der Arbeitszahlen, da die Wärmepumpe weniger taktet (Tabelle 1) [2]. Infolge der limitierten Wärmepumpenlaufzeit wird keine Komforteinbuße festge-

**Tabelle 1. Arbeitszahlen der Wärmepumpe bei nachfragegeführtem und auf Gleichzeitigkeit optimiertem Betrieb [2]**  
**Table 1. Annual performance factor for the heat pump for demand-led or self-consumption optimized operation**

|            | Betriebsweise optimiert nach |                  |
|------------|------------------------------|------------------|
|            | Nachfrage                    | Gleichzeitigkeit |
| Heizung    | 3,8                          | 4,9              |
| Warmwasser | 3,6                          | 3,9              |

stellt. Trotz der langen Sperrzeit von 15 h beträgt der Temperaturabfall nur rund 1 K [1]. Die Mieter sind mit den Temperaturen in ihren Wohnungen sehr zufrieden und es steht immer genügend Warmwasser zur Verfügung. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Warmwasserspeicher mit 800 l für die aktuelle Belegung des Gebäudes mit vier Personen großzügig ausgelegt ist.

Damit in einem Gebäude solch eine Laufzeitbeschränkung ohne Komforteinbuße realisiert werden kann, muss das Gebäude eine entsprechende energetische Flexibilität aufweisen. Es muss thermisch ausreichend träge sein und ein sehr gutes Dämmniveau aufweisen, um bei längeren Sperrzeiten den Temperaturabfall gering zu halten. Zudem darf der Warmwasserspeicher nicht zu knapp bemessen sein.

Die beschriebene Erhöhung der Gleichzeitigkeit wird bei diesem Gebäude ohne zusätzlichen technischen und finanziellen Aufwand erreicht. Die Nutzer haben keine Komforteinbuße oder Einschränkungen in ihrem Verhalten. Aus diesen Gründen soll untersucht werden, ob die gefundenen Erkenntnisse auch für andere Bauweisen angewendet werden können. An Hand von thermischen Gebäudesimulationen wird untersucht, ob die am realen Gebäude durchgeführte Laufzeitbeschränkung auch in einem Massiv- und in einem Leichtbau funktioniert und ob auch kürzere Laufzeiten ohne Komforteinbuße möglich sind. Details zur Simulation können [3] entnommen werden.

## 1.2 Methodik

Für die Gebäudesimulation wird auf der Grundlage der Planungsunterlagen sowie Informationen zur tatsächlichen Objektsituation ein thermisches Gebäudemodell für das Mehrfamilienhaus erstellt. Das Modell wird mit den Messwerten aus der zweiten Heizperiode (Winter 2012/2013, 10.02.–11.03.2013, Außenlufttemperatur: mittel  $1,8 \pm 4,7$  °C, min/max:  $-12/17$  °C) validiert. Hierzu werden die an den Temperaturfühlern „Wohnen“ gemessenen Temperaturen und der gemessene Heizwärmeverbrauch je Wohnung herangezogen.

Zur Durchführung der Simulationsrechnungen wird die an der Universität Strathclyde entwickelte Simulationsumgebung „ESP-r“ [4] eingesetzt.

## 2 Randbedingungen

### 2.1 Beispielgebäude

Das betrachtete, sehr gut gedämmte Gebäude ist ein kleines Mehrfamilienhaus im Kanton Aargau (Schweiz). Das zweigeschossige, unterkellerte Gebäude hat eine beheizte Wohnfläche von 320 m<sup>2</sup> (Bild 1). Im Erd- und Obergeschoss befindet sich je eine Wohnung mit einer beheizten Fläche von



**Bild 1. Ansichten des untersuchten Mehrfamilienhauses**  
 (Quelle: Setz Architektur, FHNW IEBau)

**Fig. 1. View of the multi-family dwelling studied**  
 (© Setz Architektur, FHNW IEBau)

135 m<sup>2</sup>, im Keller zusätzlich ein Studio mit 50 m<sup>2</sup> beheizter Fläche. Das Gebäude ist mit Minergie AG-005-P-ECO zertifiziert und hat den Schweizer Solarpreis 2012 in der Kategorie PlusEnergieBau gewonnen. Detaillierte Daten zum Gebäude können [1], [2] entnommen werden. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird zu 100 % mit einer 8,9-kW-Sole-Wasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Das Gebäude verfügt über eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Photovoltaikanlage mit 20 kWp ist nach Süden mit einer Neigung von 10° ausgerichtet und hat einen prognostizierten Jahresertrag von rund 18 000 kWh.

### 2.2 Festlegungen und Annahmen

Trotz Monitorings des Gebäudes sind sehr viele Daten, die für die thermische Simulation notwendig sind, nicht bekannt. Daher müssen verschiedene Annahmen und Festlegungen getroffen werden [3]:

- Es wird angenommen, dass der Sonnenschutz immer oben ist (Heizperiode).
- Es wird angenommen, dass kein energetisch relevanter Luftaustausch zwischen den Räumen besteht (Zimmertüren sind zu).
- Anzahl und Aufenthaltszeit von Personen in den einzelnen Räumen werden in Abhängigkeit von der aktuellen Mieterbelegung festgelegt. Es wird nur der sensible Anteil der Wärmeabgabe der Personen betrachtet (50 % Strahlung, 50 % Konvektion [5], 70 W/P in Anlehnung an [6]).
- Die Verteilung der Elektrizitätsverbraucher (Geräte, Beleuchtung) wird für die einzelnen Räume festgelegt. Der Anteil der Wärmeabgabe durch Wärmestrahlung und Konvektion für Geräte und Beleuchtung wird ebenfalls auf 50 % Strahlung und 50 % Konvektion festgesetzt, da die Messwerte nicht auf Geräte bzw. Beleuchtung aufgeteilt werden können. Nach [5] ist der Anteil für Strahlung bzw. Konvektion für Geräte und Beleuchtung genau umgekehrt, so dass in der Gesamtbetrachtung beide Anteile als gleich groß angenommen werden.
- Thermische Massen der Einrichtungsgegenstände werden definiert (Abschn. 2.4.2).
- Die Lüftung wird pro Raum auf einen definierten, konstanten Luftwechsel festgelegt. Dieser berücksichtigt:
  - die wohnungsweise Regelung der Lüftungsanlage
  - den Anteil an Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage (80 %)
  - die manuelle Fensterlüftung
- Der Temperaturfühler für die Anzeige der Temperatur „Wohnen“ ist in einer kleinen Vertiefung in der Wand



Bild 2. Abdeckung eines Temperaturfühlers (links) und Anzeige der gemessenen Temperatur am Temperaturfühler und der lokalen Außenlufttemperatur (rechts) (Quelle: IEBau)  
Fig. 2. Cover of indoor temperature sensor (left) and display with indoor sensor and local ambient air temperature (© IEBau)

platziert (Bild 2). Die genaue Position des eigentlichen Temperatursensors ist nicht bekannt. Üblich ist, dass derart positionierte Temperaturfühler eine Mischtemperatur aus Luft- und Wandtemperatur messen. Je nach Position des Fühlers im Gehäuse, Geometrie des Gehäuses und generellem Aufbau des Wandfühlers liegen die Anteile der Mischtemperatur in etwa in dem Bereich von 20–50 % Lufttemperatur und entsprechend 80–50 % Wandtemperatur [7]. Für das Simulationsmodell wird angenommen, dass der Temperaturfühler zu 33 % die Lufttemperatur und zu 67 % die Wandtemperatur (Putztemperatur) misst.

## 2.3 Zonierung des thermischen Modell

Das Simulationsmodell besteht aus 15 thermischen Zonen. In den Wohnungen wird jeder Raum als einzelne Zone abgebildet. Dies ergibt sechs thermische Zonen pro Erd- und Obergeschosswohnung und zwei Zonen für das Studio im Kellergeschoss. Der unbeheizte Bereich im Keller gliedert sich in drei Vorratsräume, Heizungsraum und einen Vorraum. Im Modell wird der unbeheizte Kellerbereich in eine thermische Zone zusammengefasst (Bild 3).

Die Verschattung der Fenster durch den vorgelagerten Balkon und das vorgezogene Dach, die tiefen Fensterlaibungen sowie im Kellergeschoss durch die Gartensituation wird ebenso wie die Verschattung durch das Nachbarhaus auf der Südseite bei der Simulation berücksichtigt.

## 2.4 Varianten

### 2.4.1 Allgemein

Bei der Parametervariation werden nur die Konstruktionen sowie die Laufzeiten der Wärmepumpe variiert. Alle anderen Einstellungen und Parameter entsprechen dem validierten Modell. Dies betrifft neben dem Luftwechsel die Personenbelegung und insbesondere auch die Einstellung der Soll-Temperaturen am Temperaturfühler für die Heizungsregelung der einzelnen Räume. Diese wird bewusst nicht angepasst/optimiert, um die Auswirkungen der variierten Parameter klarer zu isolieren.

### 2.4.2 Bauweise/Konstruktionen

Das Gebäude ist nach dem SIA 380/1 (2009) [8] Nachweis für Heizwärmebedarf in der Bauweise „mittel“ erstellt. Böden, Dach und Kellerwände sind in Beton, die Außen-



Bild 3. Aufteilung der thermischen Zonen; Lage der Temperaturfühler (rot) und Heizungsthermostate (orange) im Raum „Wohnen“

Fig. 3. Layout of thermal zones; positions of the temperature sensor (red) and the heating thermostat (orange) in the livingroom

wände in Porenbeton ausgeführt. Die Gebäudehülle ist komplett außenseitig gedämmt. Die Innenwände bestehen aus Porenbeton, Kalksandstein oder Gipskartonplatten. Zwar ist das Gebäude ein „Massivbau“, jedoch durch den hohen Porenbetonanteil als ein „leichter“ Massivbau einzustufen. Um die Wärmespeicherfähigkeit abzuschätzen, werden übliche Annahmen für die Materialien getroffen.

Für die Bauweise „massiv“ werden übliche Wanddicken für Beton gewählt. Der Porenbeton (175 mm) der Außenwände wird mit 250 mm Beton ersetzt sowie alle Innenwände in 200 mm Beton ausgeführt. Bei der Bauweise „leicht“ werden die Außenwände über Terrain, die Geschossdecke EG/OG, das Dach sowie die Innenwände in Leichtbauweise dargestellt. Das Untergeschoss und die Geschossdecke UG/EG bleiben für alle Varianten gleich. Bei den Varianten werden die U-Werte der Außenwände und des Dachs jeweils über die Dämmstoffdicke auf die realen U-Werte angepasst. Der genaue Aufbau ist [3] zu entnehmen.

In Tabelle 2 ist die nach SN EN ISO 13786:2007 [9] berechnete Wärmespeicherfähigkeit des gesamten beheizten Gebäudebereiches für die verschiedenen, untersuchten Bauweisen zusammengestellt (dynamisches Verfahren). Wie erwartet zeigt sich, dass die Wärmespeicherfähigkeit des realen Gebäudes deutlich näher an der Massiv- als an der Leichtbauweise liegt. Die thermische Masse der Möbel wird mit dem vereinfachten Verfahren

nach [9] zu  $7 \text{ Wh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \text{ K})$  bzw.  $1,8 \text{ kWh/K}$  bestimmt ( $\text{NGF}$  Nettogeschossfläche).

### 2.4.3 Laufzeitbeschränkung

Die Laufzeitbeschränkung der Wärmepumpe wird für Heizwärme ausgehend von dem „realen“ Fall mit einer Laufzeit von 10–13/14–19 Uhr (max. 8 h) in drei Schritten auf 10–13/14–16 (max. 5 h) reduziert (Tabelle 3). Es wird aufgrund der Messwerte angenommen, dass zwischen 13–14 Uhr das Warmwasser bereitet wird.

### 2.4.4 Auswertung

Die Auswertung und der Vergleich der Varianten erfolgt im Wesentlichen über eine Betrachtung der Summenhäufigkeit der berechneten operativen Temperatur im Raum „Wohnen“ der einzelnen Wohnungen sowie über die Komfortbedingungen gemäß den Normen SIA 180 [10] und SN EN ISO 7730 [11]. Die Komfortanforderungen (auf der Grundlage von Stundenmittelwerten) lauten:

- SIA 180: Die operativen Temperaturen müssen während der gesamten Nutzungszeit in dem Bereich von  $20,5\text{--}24,5^\circ\text{C}$  liegen, wenn der gleitende Mittelwert der Außenlufttemperatur über 48 Stunden  $\leq 12^\circ\text{C}$  ist.
- SN EN ISO 7730: Der zulässige Bereich der operativen Temperaturen wird in die Komfortklasse A ( $22^\circ\text{C} \pm 1 \text{ K}$ ), B ( $22^\circ\text{C} \pm 2 \text{ K}$ ) und C ( $22^\circ\text{C} \pm 3 \text{ K}$ ) eingeteilt.

Insgesamt werden 12 Varianten betrachtet, nämlich drei Konstruktionsvarianten gemäß Abschn. 2.4.2 mit je vier Laufzeitintervallen gemäß Tabelle 3. Die drei Wohnungen des betrachteten Gebäudes werden getrennt diskutiert und

*Tabelle 2. Wärmespeicherfähigkeiten des beheizten Gebäudebereichs für verschiedenen Bauweisen (dynamisches Verfahren), Periodendauer: 24 h, mit Wärmeübergangswiderständen [9]*  
*Table 2. Heat capacity of heated building area calculated for all three constructions (dynamic method), time period 24 h, including heat transfer resistance [9]*

| Bauweise | $C_R/A_{\text{NGF}}^*$<br>[Wh/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> K)] | $C_R^*$<br>[kWh/K] | Zuschlag<br>Möbel [%] |
|----------|------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| real     | 63                                                               | 17                 | 11/11                 |
| massiv   | 79                                                               | 21                 | 9/9                   |
| Leicht   | 40                                                               | 11                 | 18/16                 |

\*Wert ohne Möbel

*Tabelle 3. Übersicht der untersuchten Laufzeiten bzw. Sperrzeiten der Wärmepumpe zu Heizzwecken (ohne 1 h/d BWW Brauchwarmwasser)*

*Table 3. Overview of on- and off-periods for the heat pump for heating demand (without 1 h/d DHW domestic hot water)*

| Laufzeit        | Max. mögliche<br>Laufstunden pro<br>Tag für Heizzwecke | Fixe Sperrzeit<br>der Wärmepumpe<br>pro Tag |
|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 10–13/14–19 Uhr | 8 h                                                    | 15 h                                        |
| 10–13/14–18 Uhr | 7 h                                                    | 16 h                                        |
| 10–13/14–17 Uhr | 6 h                                                    | 17 h                                        |
| 10–13/14–16 Uhr | 5 h                                                    | 18 h                                        |

es liegen damit insgesamt 36 Fälle vor. Der Betrachtungszeitraum ist für alle Auswertungen: 10.02.–11.03.2013.

## 3 Resultate

### 3.1 Validierung

Die Validierung des Modells erfolgt für die Bauweise real mit einer Wärmepumpenlaufzeit von 10–13/14–19 Uhr für Heizwärme. Als Referenzgrößen werden die an den Temperaturfühler in den Räumen „Wohnen“ gemessenen Temperaturen sowie der gemessene Heizwärmeverbrauch verwendet.

In Tabelle 4 ist der Heizwärmebedarf dem Heizwärmeverbrauch gegenübergestellt. Die Wärmezähler für den Heizwärmeverbrauch befinden sich in jeder Wohnung. Der Heizwärmebedarf wird aus dem Volumenstrom der Fußbodenheizung und der Vor- und Rücklaufstemperatur pro Wohnung ermittelt. Der Heizwärmeverbrauch kann in der Simulation mit sehr guter Genauigkeit nachvollzogen werden.

Die gemessenen und berechneten mittleren Temperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ sind für den betrachteten Zeitraum in Tabelle 5 zusammengestellt. Den zeitlichen Verlauf der Temperaturen zeigt Bild 4. Die gemessenen Temperaturen können mit den getroffenen Annahmen in der Simulation hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung mit sehr guter Genauigkeit nachvollzogen werden. In den Räumen „Wohnen“ im OG und UG stimmen auch die zeitlichen Verläufe überwiegend gut überein. Im Raum „Wohnen“ im EG sind die Abweichungen im zeitlichen Verlauf z. T. größer. Die Ursache hierfür ist unklar, jedoch kann mit der verfügbaren Information keine weitere Annäherung erreicht werden. Da der Mittelwert und die Standardabweichung der Temperaturen gut übereinstimmen und der Heizwärmebedarf ebenfalls, wird die Abwei-

*Tabelle 4. Gemessener Heizwärmeverbrauch und berechneter Heizwärmebedarf (Bauweise real, WP-Laufzeit 10–13/14–19 Uhr)*

*Table 4. Measured and calculated heat demand (actual construction, HP run-time: 10 am–13 pm/14–19 pm)*

|       | Heizwärmeverbrauch<br>[kWh] | Heizwärmebedarf<br>[kWh] | Abw. [%] |
|-------|-----------------------------|--------------------------|----------|
| UG    | 311                         | 306                      | –2       |
| EG    | 580                         | 560                      | –3       |
| OG    | 728                         | 70                       | –2       |
| Total | 1619                        | 1576                     | –3       |

*Tabelle 5. Mittlere gemessene und berechnete Raumlufttemperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ (Bauweise real, 10–13/14–19 Uhr).*

*Table 5. Average measured and calculated temperatures at the temperature sensors (actual construction, 10 pm–1 am/2–7 am)*

|    | Mittlere Temperatur am Temperaturfühler „Wohnen“ [°C] |                |
|----|-------------------------------------------------------|----------------|
|    | gemessen                                              | berechnet      |
| UG | $21,9 \pm 0,4$                                        | $21,9 \pm 0,4$ |
| EG | $21,6 \pm 0,3$                                        | $21,7 \pm 0,4$ |
| OG | $22,8 \pm 0,4$                                        | $22,9 \pm 0,4$ |



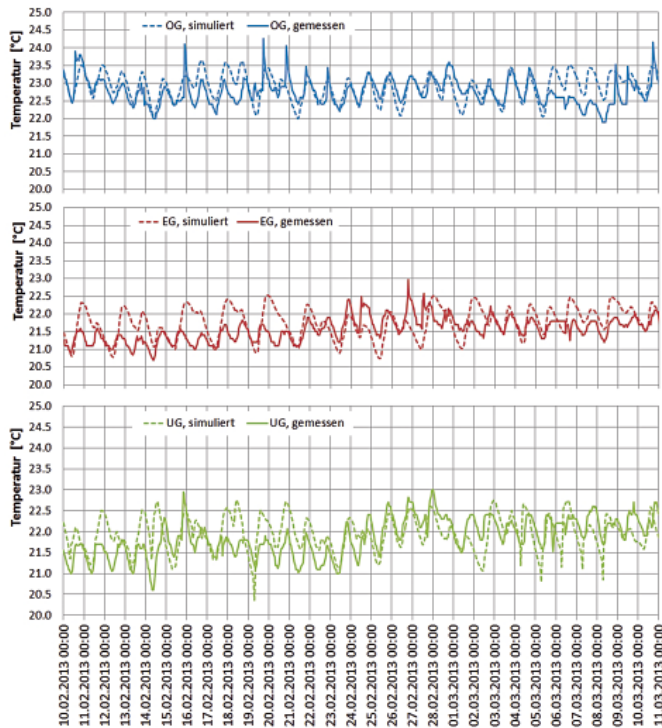


Bild 4. Gemessene und berechnete Temperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ im Unter-, Erd- und Obergeschoss (Stundenwerte). Die Plateaus in den Messwerten weisen auf einen Datenausfall hin

Fig. 4. Measured and simulated temperatures at the temperature sensor „living“ for ground, first and second floor (hourly values). Plateaus in measured values are due to a temporary loss of data

chung im zeitlichen Verlauf jedoch als akzeptabel gewertet. Das Simulationsmodell wird damit als validiert betrachtet.

### 3.2 Operative Temperaturen

Die Summenhäufigkeit der Stundenwerte der simulierten operativen Temperatur der Räume „Wohnen“ in den einzelnen Wohnungen gibt eine Übersicht über den Einfluss der betrachteten Bauweisen und Laufzeiten auf das thermische Gebäudeverhalten. Bild 5 zeigt links die Ergebnisse für die Bauweise „real“, in der Mitte die Ergebnisse für die Bauweise „massiv“ und rechts die Ergebnisse für die Bauweise „leicht“. Ganz rechts sind die Bereiche der Komfortklassen A bis C gemäß SN EN ISO 7730 gegeben. Der obere und untere Grenzwert gemäß SIA 180 ist jeweils als rote Linie in die Grafiken eingetragen.

Die einzelnen Zeilen stehen für die verschiedenen langen Laufzeiten der Wärmepumpe gemäß Tabelle 3. Die Mittelwerte und Standardabweichungen für die operativen Temperaturen sind ebenfalls angegeben. Folgende Erkenntnisse können bzgl. der operativen Temperaturen gewonnen werden:

- In mindestens 95 % der Stunden im Beobachtungszeitraum ist die operative Temperatur in allen Räumen „Wohnen“ für alle Laufzeitintervalle außer der kürzesten für die Bauweisen „real“ und „massiv“ oberhalb von 20 °C. In den wenigen Reststunden (frühe Morgenstunden ca. 5–10 Uhr) liegt die Temperatur zwischen 19–20 °C. Mit Ausnahme der Temperatur in OG-Wohnen in der Bauweise „real“ liegen die Mittelwerte der operativen Tempe-

ratur für die verschiedenen Laufzeiten sehr nahe beieinander. Bei OG-Wohnen ist eine Abnahme des Mittelwertes um 0,6 K zu verzeichnen. Trotzdem liegt die mittlere Temperatur in OG-Wohnen immer noch bei 21,9 °C und ist damit immer noch auf einem hohen Niveau. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bauweisen „real“ und „massiv“ bzgl. der verfügbaren Betriebszeit der Wärmepumpe für Heizwärme eine gewisse Flexibilität aufweisen.

- In der Bauweise „leicht“ liegt die operative Temperatur nur in UG-Wohnen in mindestens 95 % der Stunden im Beobachtungszeitraum für alle Laufzeitintervalle außer dem kürzesten oberhalb von 20 °C. Bei OG-Wohnen ist dies nur bei der längsten Laufzeit von 10–13/14–19 Uhr der Fall. Die Temperaturen in EG-Wohnen liegen je nach Laufzeit bis zu 10–60 % der Stunden im Betrachtungszeitraum unterhalb von 20 °C. Die Untergeschosswohnung ist allerdings auch in der Bauweise „leicht“ als „massiv“ einzustufen.
- Bei dem kürzesten betrachteten Laufzeitintervall von 10–13/14–16 Uhr mit nur fünf Stunden Zeit für die Bereitstellung der Heizwärme liegen die Temperaturen in allen Räumen „Wohnen“ bei allen Bauweisen zum größten Teil der Stunden des Betrachtungszeitraums unter 20 °C. Diese Laufzeit ist damit ohne Anpassung der Gebäudetechnik bei keiner Bauweise möglich.

### 3.3 Komfort

Die höchste operative Temperatur in den Räumen „Wohnen“ liegt immer im zulässigen Bereich von SIA 180 bzw. mindestens in der Komfortklasse C, während die tiefste operative Temperatur nur in zwei Fällen den Bereich von SIA 180, in 19 Fällen mindestens die Komfortklasse C und in 17 keine Komfortklasse einhält. Die Unterschreitung der unteren Komfortgrenztemperatur ist in den meisten Fällen damit für die Einordnung in eine Komfortklasse ausschlaggebend. Die erreichte Komfortklasse ergibt sich aus der ungünstigsten Einstufung der höchsten bzw. tiefsten operativen Temperatur in den Räumen „Wohnen“. Die resultierenden Komfortklassen für die 36 Fälle sind in Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bauweisen „real“ und „massiv“ dieselbe Verteilung der Komfortklassen in den einzelnen Räumen „Wohnen“ aufweisen.

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden

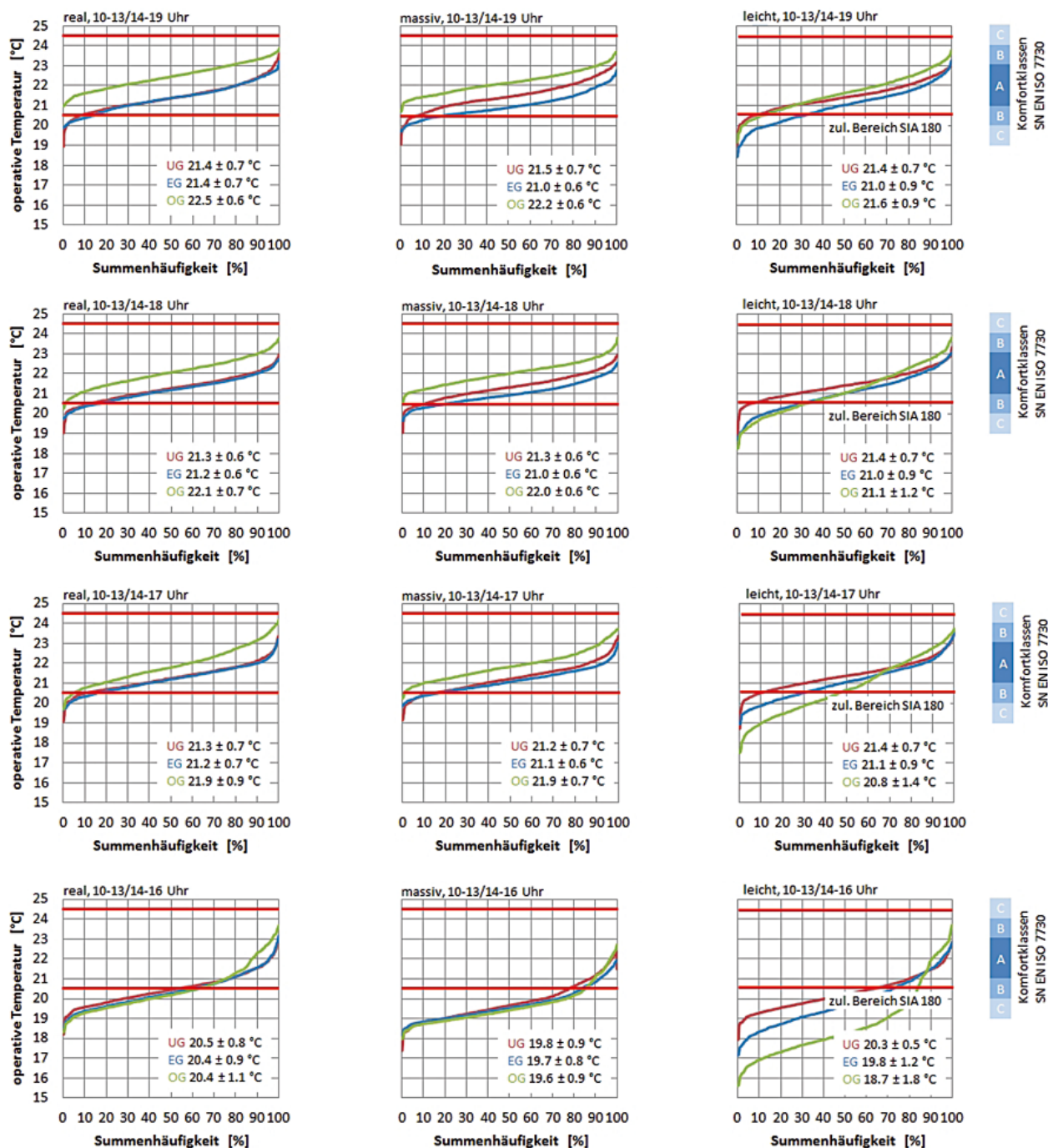
- OG-Wohnen in den Bauweisen „real“ und „massiv“ weist den höchsten thermischen Komfort auf. Für die längste Laufzeit von 10–13/14–19 Uhr kann dieser Raum als einziger die neuen Anforderungen gemäß SIA 180:2014 erfüllen.

- Bei der kürzesten Laufzeit von 10–13/14–16 Uhr wird in keinem Raum „Wohnen“ ein normkonformer thermischer Komfort erreicht.
- Werden kurzzeitig, d. h.  $\leq 5$  % der Stunden (Bild 5), operative Temperaturen im Bereich 19–20 °C toleriert, dann kann bei den Bauweisen „real“ und „massiv“ die Laufzeit der Wärmepumpe auf 10–13/14–17 Uhr beschränkt und die Beheizung des Gebäudes könnte mit einer hohen Gleichzeitigkeit betrieben werden.
- Grundsätzlich treten die tiefsten Temperaturen aufgrund der beschränkten Wärmepumpenlaufzeit in den Morgenstunden (ca. 5–10 Uhr) auf. Die erhöhte Gleich-

**Tabelle 6. Komforteinstufungen für den Raum „Wohnen“ nach SIA 180 und den Komfortklassen nach SN EN ISO 7730 unter Berücksichtigung der Bauweise und der Laufzeit der Wärmepumpe. Die Einstufung erfolgt über die maximal und minimal auftretenden operativen Temperaturen**

**Table 6. Comfort compliance for the living rooms according to SIA 180 and according to the comfort classes of SN EN ISO 7730 for the considered constructions and run time schedules of the heat pump. The evaluation is based on min/max. values of the operative temperatures**

| Laufzeit der Wärmepumpe für Heizbetrieb | Bauweise "real" |    |    |         | Bauweise "massiv" |    |    |         | Bauweise "leicht" |    |    |
|-----------------------------------------|-----------------|----|----|---------|-------------------|----|----|---------|-------------------|----|----|
|                                         | UG              | EG | OG |         | UG                | EG | OG |         | UG                | EG | OG |
| 10–13/14–19 Uhr                         | C               | C  | B  | SIA 180 | C                 | C  | B  | SIA 180 | –                 | –  | C  |
| 10–13/14–18 Uhr                         | C               | C  | B  |         | C                 | C  | B  |         | –                 | –  | –  |
| 10–13/14–17 Uhr                         | C               | C  | C  |         | C                 | C  | C  |         | –                 | –  | –  |
| 10–13/14–16 Uhr                         | –               | –  | –  |         | –                 | –  | –  |         | –                 | –  | –  |



**Bild 5. Summenhäufigkeit, Mittelwert und Standardabweichung der simulierten operativen Temperaturen in den Räumen „Wohnen“ der Unter-, Erd- und Obergeschosswohnung für alle Bauweisen bei verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe**  
**Fig. 5. Cumulative percentage, mean value and standard deviation of simulated operative temperatures for the livingroom in the ground, first and second floor apartments for all constructions and run time schedules considered**

zeitigkeit muss ggf. mit einer angepassten Kleidung „erkauft“ werden.

- Für das Gebäude in Leichtbau kann der thermische Komfort gemäß aktueller Normung mit den betrachteten Laufzeiteinschränkungen für Heizwärme nicht erreicht werden. Es wird eine längere Wärmepumpenlaufzeit notwendig, was für leichte Gebäude eine Reduktion der Gleichzeitigkeit mit sich bringt.
- Die Bewertung nach den Komfortkriterien ist strenger als die Einschätzung nach der Änderung der Mittelwerte und Anzahl Stunden unterhalb einer bestimmten Temperatur. Je nach Anforderung an eine Komfortbedingung ist eine Einschränkung der Wärmepumpenlaufzeit, wie sie hier durchgeführt wird, nicht möglich.
- Um insgesamt das Niveau der operativen Temperaturen zu heben, müssten die Temperaturen in den Räumen „Wohnen“, insbesondere im Unter- und Erdgeschoss, angehoben werden. Dies widerspricht bei diesem Gebäude den Wünschen der Nutzer.

### 3.4 Auslastung der Heizkreise

Die Auslastung der Heizkreise für die Räume „Wohnen“ soll Aufschluss darüber geben, in wie weit die der Wärmepumpe für Heizzwecke zur Verfügung gestellte Laufzeit tatsächlich genutzt wird. Die Heizkreise werden per Ventil mit Auf/Zu-Prinzip gestellt. Zur Bewertung wird die anteilige Zeit „Auf“ bezogen auf die jeweils erlaubte Laufzeit herangezogen (Bild 6). Folgende Erkenntnisse werden gewonnen:

- Bis auf die kürzeste Laufzeit sind in den Räumen „Wohnen“ der Unter- und Erdgeschosswohnung die Ventile der Heizkreisläufe für alle Bauweisen zwischen 50–73 %

der Zeit offen. Das heißt, die Ventile könnten länger geöffnet bleiben. Das Potential, um die operativen Temperaturen anzuheben, ist noch nicht ausgeschöpft.

- Im Raum „Wohnen“ der Obergeschosswohnung ist die mittlere Temperatur am Ausgangspunkt der Betrachtungen schon um 0,9–1,2 K höher als in den anderen beiden Wohnungen (Tabelle 5, Bild 5). Die Auslastung liegt mit 73–100 % entsprechend höher und das Potential des Heizkreises ist für alle betrachteten Laufzeitbeschränkungen nahezu ausgeschöpft.
- Bei der Laufzeit von 10–13/14–16 Uhr ist das Potential für alle Varianten ausgeschöpft. Die Heizkreise sind zu 88–96 % während der gesamten Laufzeit offen und die operative Temperatur kann nicht mehr erhöht werden.

### 3.5 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf ist für alle Bauweisen sehr ähnlich und sinkt leicht mit kürzer werdenden Laufzeiten der Wärmepumpe ab (Bild 7). Dies korreliert mit den sinkenden mittleren operativen Temperaturen. Bei der kurzen Laufzeit von 10–13/14–16 Uhr ist der Heizwärmebedarf erwartungsgemäß am geringsten.

Der Heizwärmebedarf der Erdgeschosswohnung in der Leichtbauweise nimmt gegenüber den anderen beiden Bauweisen zu, während der Heizwärmebedarf der Obergeschosswohnung abnimmt. Dies ist eine Folge der Konstruktion. Bei der Bauweise „real“ und „massiv“ beträgt die Trittschalldämmung in der Geschossdecke 40 mm oberhalb der Betondecke, während im Leichtbau zusätzlich ein 200 mm dickes Material als Masse in der Leichtbaudecke vorgesehen ist. Damit verändert sich die Dämmeigenschaft der Zwischendecke. Im Leichtbau wird die Erdgeschosswohnung thermisch

Bild 6. Auslastung des Heizkreises „Wohnen“ für alle Bauweisen und Laufzeiten

Fig. 6. Usage rate of living room heat circuits for all construction types and run time schedules

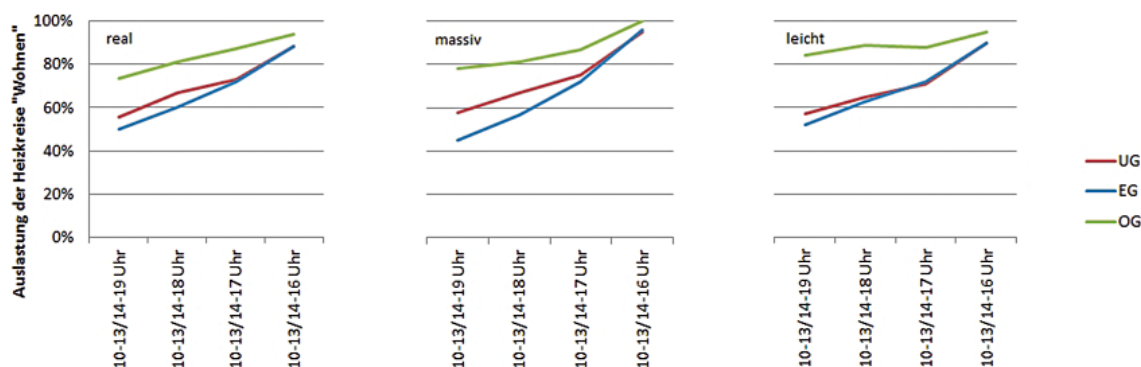
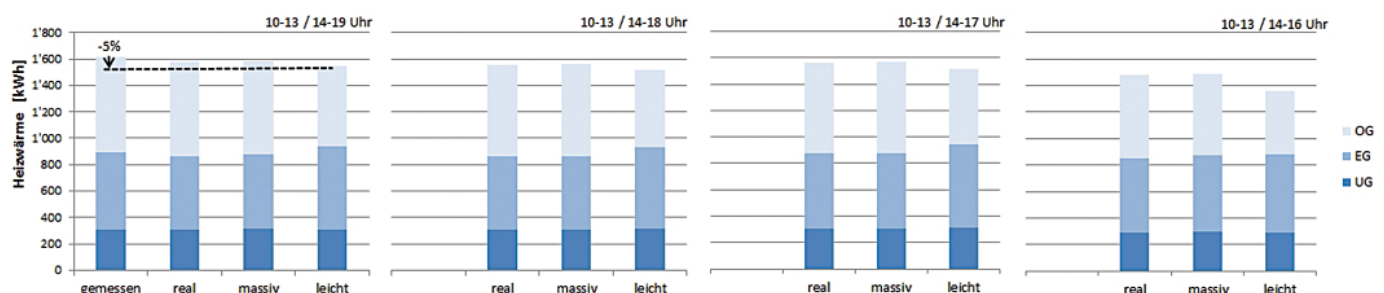


Bild 7. Heizwärmeverbrauch und -bedarf für das Unter-, Erd- und Obergeschoss für die Bauweisen „real“, „massiv“ und „leicht“ bei verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe

Fig. 7. Heat consumption and demand for all flats and considered constructions and run-time schedules for the heat pump





stärker von der Obergeschosswohnung abgekoppelt. Da die Obergeschosswohnung eine höhere Temperatur aufweist als die Erdgeschosswohnung, heizt die Obergeschosswohnung bei den Bauweisen „real“ und „massiv“ die Erdgeschosswohnung mit. Dieser Austausch wird in der Leichtbauweise reduziert und somit steigt der Heizwärmebedarf in der Erdgeschosswohnung und sinkt in der Obergeschosswohnung.

## 4 Diskussion

### 4.1 Komfort

Zur Beurteilung des Komforts werden die Normen SIA 180 und SN EN ISO 7730 herangezogen. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und Konzepte der Normen lässt SN EN ISO 7730 mehr Freiheiten. Unverständlich ist, warum in SIA 180 der Temperaturbereich von 20,5–24,5 °C gegenüber der Komfortklasse B aus SN EN ISO 7730 um ein halbes Grad angehoben wurde. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1 auf einer operativen Temperatur – in SIA 380/1 Raumtemperatur genannt – von 20 °C beruht [8]. Das heißt, ein Gebäude, welches auf Normtemperatur beheizt wird, ist nach SIA 180 bzgl. des Komforts nicht zulässig. In der Vorgängerversion der aktuellen SIA 180 wird eine operative Temperatur während der Heizperiode von 19–24 °C als angenehm bezeichnet. Dies deckt in etwa den Bereich der Komfortklasse C von SN EN ISO 7730 ab. Eine Vereinheitlichung der Anforderungen in den verschiedenen Normen wäre sinnvoll.

Die Mieter in dem untersuchten Gebäude sind mit den Temperaturen in ihren Wohnungen sehr zufrieden, obwohl davon auszugehen ist, dass auch in der Realität die operative Temperatur ähnlich schwankt, wie es die Simulation zeigt. Das heißt, kurzzeitige Unterschreitungen der Minimaltemperatur von 20 °C bzw. 20,5 °C werden von den Mietern offensichtlich nicht als störend empfunden. Für die Mieter ist der untere Grenzwert von Komfortklasse C in diesem gut gedämmten Gebäude akzeptabel. Die Beschränkung der Laufzeit der Wärmepumpe haben die Mieter nicht bemerkt. Nach ihrem Empfinden stand immer genügend Heizwärme und Warmwasser zur Verfügung.

### 4.2 Wärmeerzeugerleistung

Die notwendige Wärmeerzeugerleistung (Heizung, Warmwasser, Verluste, Annahme 4 h Sperrzeit) für das Gebäude wurde gemäß dem HLK-Planer zu 7 kW bestimmt und das nächst größere Wärmepumpenmodell vom gewünschten Fabrikat installiert (8,9 kW). Die installierte Wärmepumpe ist somit um knapp 30 % größer als nach Auslegung notwendig. Die einhergehende Vergrößerung der Erdsondenlänge hat den Vorteil, dass der Erde pro Volumen weniger Wärme entzogen wird und dadurch die Quelltemperatur verbessert. Weiter bietet eine Überdimensionierung eine Leistungsreserve, da die Auslegung der Heizleistung für 20 °C erfolgt und Nutzer häufig höhere Raumtemperaturen wünschen – im vorliegenden Fall beispielsweise im Mittel über die drei Wohnungen rund 22 °C.

Aus den Messwerten lässt sich auf Basis von Stundenwerten, mit und ohne Sperrzeit, eine maximale Heizleistung von ca. 5 kW ableiten. Die Leistung für die Warmwas-

serbereitung beträgt nach den Messdaten im Maximum rund 0,3 kW. Damit ergibt sich eine gemessene maximale Wärmeerzeugerleistung von ca. 5,3 kW. Diese beinhaltet im Gegensatz zum Planungswert sämtliche internen Wärmegewinne.

Mit der Simulation lässt sich die tiefere Wärmepumpenleistung aus der Planung leicht abbilden. In Bild 8 sind die resultierenden operativen Temperaturen in den Räumen „Wohnen“ in der Bauweise „real“ für die zwei längsten Laufzeiten für die 7- und 8,9-kW-Wärmepumpe gegenübergestellt. Mit der 7-kW-Wärmepumpe sinken schon bei der Laufzeit 10–13/14–19 Uhr die operativen Temperaturen in allen Räumen „Wohnen“ gegenüber dem Fall mit 8,9 kW ab. Die größte Temperaturreduktion tritt im Oberschoss auf. Noch deutlicher fallen alle Temperaturen bei der Laufzeit von 10–13/14–18 Uhr.

Mit der 7-kW-Wärmepumpe wäre schon die Laufzeitbeschränkung auf 10–13/14–19 Uhr nicht möglich gewesen. UG-Wohnen fällt ganz knapp aus der Komfortklasse C, EG-Wohnen bleibt in Komfortklasse C und OG-Wohnen erreicht ebenfalls nur noch Komfortklasse C. Die mittlere operative Temperatur in der Obergeschosswohnung fällt um 0,5 K bei der Reduktion der Wärmepumpenleistung von 8,9 auf 7 kW.

Die um knapp 30 % überdimensionierte Wärmepumpe hat neben den o. g. Vorteilen auch den Vorteil, dass durch die Leistungsreserve eine lange Sperrzeit möglich ist. Dies ermöglicht einen flexibleren Umgang mit den Betriebszeiten der Wärmepumpe, was für die Erhöhung der Gleichzeitigkeit genutzt werden kann.

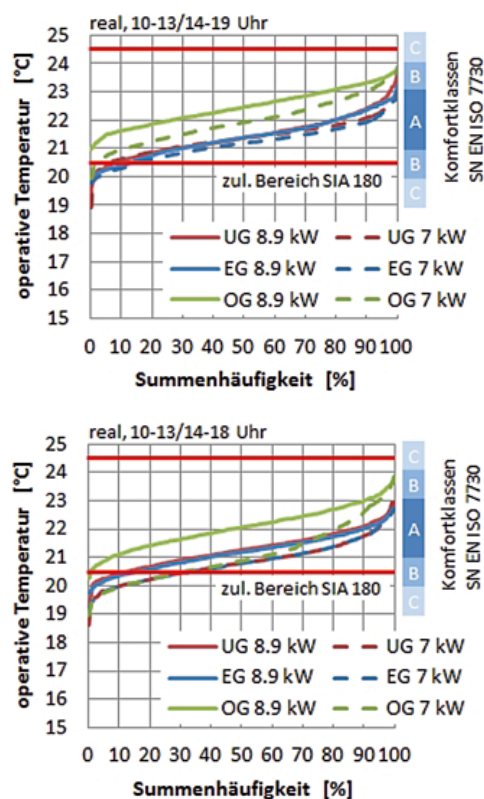


Bild 8. Operative Temperaturen in den Räumen „Wohnen“ mit einer 7- und 8,9-kW-Wärmepumpe und verschiedenen Laufzeiten (Bauweise „real“)

Fig. 8. Operative temperatures for living rooms with a 7 and 8.9 kW heat pump and different run time schedules (actual construction)



### 4.3 Flexibilität

Die Diskussion über zulässige operative Temperaturen gewinnt mit der aktuellen Thematik über die energetische Flexibilität von Gebäuden an Brisanz. Wird der zulässige Bereich für die Temperaturen größer, können Dauer und Zeitpunkt des Energieeinsatzes für die Wärmebereitstellung besser an verschiedene Bedingungen angepasst werden, wie z. B. Zeiten mit Solarangebot oder Zeiten mit günstigen Stromtarifen. Damit wird die Netzinteraktion beeinflusst. Wird einerseits das Solarangebot genutzt, verringert sich die Netzeinspeisung. Auf der anderen Seite kann das Gebäude mit einer Wärmepumpe Regelleistung zur Verfügung stellen, wenn im Netz Unter-/Überkapazitäten ausgeglichen werden müssen. In allen Fällen muss das Gebäude flexibel reagieren, ohne den Komfort negativ zu beeinflussen. Grundsätzlich erhöht sich diese Flexibilität mit der verfügbaren Breite des zulässigen oder durch den Nutzer akzeptierten Temperaturbandes.

Die mögliche Laufzeitbeschränkung der Wärmepumpe wird auch durch die Höhe der vom Nutzer gewünschten Raumtemperatur stark beeinflusst. In der Regel weicht diese, wie auch bei den Mietern in dem hier betrachteten Gebäude, gegenüber der „offiziellen Raumtemperatur“ von 20 °C (SIA 380/1) nach oben ab. Dies spiegelt sich in einer längeren Laufzeit der Wärmepumpe und damit in einer Zunahme des Heizwärmeverbrauchs wider. Die Möglichkeiten für Gleichzeitigkeit und Flexibilität nehmen ab.

Die Flexibilität des Gebäudes hat weiter einen Einfluss auf die Stromkosten, die durch das veränderte Verhalten von Netzeinspeisung und -bezug entstehen. Bei einer hohen Gleichzeitigkeit wird weniger Strom aus dem Netz bezogen bzw. eingespeist. Je nach Bezugskosten bzw. Einspeisevergütung hat dies positive oder negative finanzielle Auswirkungen.

Die in diesem Projekt untersuchten starren Sperrzeiten haben den Vorteil, dass sie mit jeder Wärmepumpe ohne technischen Zusatzaufwand realisiert werden können. An solarstrahlungsarmen Tagen ist die starre Sperrzeit jedoch nachteilig, da die Wärmepumpe innerhalb weniger Stunden am Tag den gesamten benötigten Strom bezieht. Für eine Optimierung müsste die Wärmepumpe mit einer Wettervorhersage gekoppelt werden. An Tagen mit wenig Solarstrahlung sollte die Sperrzeit für die Wärmepumpe aufgehoben werden. Sie könnte in diesem Fall entweder bedarfsgesteuert oder in Abhängigkeit von dem Strompreis betrieben werden. Auch hierfür ist eine hohe Wärmespeicherfähigkeit vorteilhaft. Sie erlaubt es, die Flexibilität des Gebäudes bezüglich Beginn und Dauer von Sperrzeiten zu erhöhen.

### 5 Zusammenfassung

Die Resultate zeigen, dass auch bei einem sehr gut gedämmten Gebäude eine hohe Wärmespeicherfähigkeit von Vorteil ist, wenn die Laufzeit der Wärmepumpe verkürzt werden soll. Eine Überdimensionierung der Wärmepumpe erweitert die Möglichkeiten, die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes flexibel einzusetzen. Bei dem hier betrachteten Gebäude reicht eine Überdimensionierung von 30 %, um für Heizzwecke mit 6–8 h Laufzeit der Wärmepumpe

auszukommen. Da die kurze Laufzeit in den Tagesstunden liegt, kann damit die Gleichzeitigkeit von PV-Ertrag und Stromverbrauch erhöht werden. Für Gebäude mit einer geringen Wärmespeicherfähigkeit ist dies mit der untersuchten Strategie nicht möglich.

Durch die hier untersuchte lange Sperrzeit ist selbst in einem sehr gut gedämmten Gebäude ein Abfall der operativen Temperatur unvermeidbar. Das Niveau und die Breite des zulässigen Temperaturbandes müssen mit den normativen Anforderungen für die Behaglichkeit abgestimmt sein. Die aktuell in der Schweizer Normung formulierten Anforderungen schränken jedoch die Nutzung der energetischen Flexibilität von Gebäuden stark ein. Es ist zu diskutieren, wie im Hinblick auf die Energiewende die normativen Anforderungen an die Behaglichkeit weiter entwickelt werden können.

### Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts „Netzbelastung von Nullenergiegebäuden“ erarbeitet, welches das Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) unter dem Kennzeichen 810000723/SI/500217-02 gefördert hat.

### Literatur

- [1] Hall, M., Dorusch, F., Geissler, A.: Optimierung des Eigenverbrauchs, der Eigendeckungsrate und der Netzbelastung von einem Mehrfamiliengebäude mit Elektromobilität. *Bauphysik* 36 (2014), H. 3, S. 117–129.
- [2] Dorusch, F., Hall, M., Dott, R.: Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil. FHNW, Institut Energie am Bau, Schlussbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, [www.fhnw.ch/habg/iebaw](http://www.fhnw.ch/habg/iebaw), 2014.
- [3] Hall, M., Geissler, A.: Netzbelastung durch Nullenergiegebäude. FHNW, Institut Energie am Bau, Schlussbericht, BFE 810000723, SI/500217-02, [www.fhnw.ch/habg/iebaw](http://www.fhnw.ch/habg/iebaw), 2014.
- [4] ESRU, ESP-r (open source): A Building and Plant Energy Simulation Environment. University of Strathclyde, Glasgow; <http://www.esru.strath.ac.uk>. Programm Version 2013.
- [5] SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. 2007.
- [6] Merkblatt SIA 2024 Standardnutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik. 2006.
- [7] Persönliche Mitteilung von Herrn Jürg Bichsel, Institutsleiter Institut Energie am Bau FHNW, Muttens, vormals Firma Sauter, Basel 19.09.2013.
- [8] SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau. 2009.
- [9] SN EN ISO 13786 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren. 2007.
- [10] SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. 2014.
- [11] DIN EN ISO 7730: 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. 2006.

### Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Monika Hall, wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Prof. Dr.-Ing. Achim Geissler, Leiter Gruppe Bau

alle:

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau  
St. Jakobs-Strasse 84, CH-4132 Muttens