



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 07. November 2014

Netzbelastung durch Nullenergiegebäude

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut Energie am Bau IEBau
St. Jakobs Strasse 84
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/habg/iebau/

Autoren:

Dr. Monika Hall, IEBau, FHNW, monika.hall@fhnw.ch
Prof. Dr. Achim Geissler, IEBau, FHNW, achim.geissler@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Rolf Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 810000723, SI/500217-02

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Summary.....	6
3	Ausgangslage	8
3.1	Zielsetzung	8
3.2	Methodik.....	8
4	Das Beispielgebäude	9
4.1	Monitoring.....	12
4.2	Raumtemperaturregelung und -anzeige.....	12
4.3	Materialisierung	13
5	Datengrundlage.....	14
5.1	Allgemein.....	14
5.2	Annahmen und Festlegungen für das Simulationsmodell	15
5.3	Regelstrategien	15
5.4	Klimarandbedingungen	20
5.5	Variantenbildung	21
5.5.1	Allgemein	21
5.5.2	Bauweise / Konstruktionen.....	21
5.5.3	Laufzeitbeschränkung.....	22
5.6	Zonierung des thermischen Modells	22
5.7	Simulationsprogramm	23
5.8	Auswertung	24
6	Resultate	25
6.1	Validierung	25
6.2	Varianten	27
6.2.1	Allgemein	27
6.2.2	Operative Temperaturen	28
6.2.3	Komfort.....	30
6.2.4	Auslastung der Heizkreise in den Räumen Wohnen.....	32
6.2.5	Heizwärmebedarf	33
6.2.6	Operative Temperaturen und gleitendes Mittel der Aussenlufttemperatur.....	34
6.3	Diskussion	35
6.3.1	Komfort.....	35
6.3.2	Flexibilität	35
6.3.3	Ausblick.....	36
7	Referenzen.....	37
8	Anhang.....	38
8.1	Pläne & Konstruktionen.....	38
8.2	Wärmespeicherfähigkeit Raum "Wohnen"	43
8.3	Thermische Massen der Einrichtungsgegenstände	44
8.4	Volumenströme der Wärmeverteilung.....	44
8.5	Luftwechsel	45
8.6	Temperaturen am Temperaturfühler	46

1 Zusammenfassung

Aus dem P&D Projekt „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil“ [1] ist bekannt, dass mit einer Beschränkung der Wärmepumpenlaufzeit auf 10-19 Uhr die Gleichzeitigkeit von Photovoltaik-Ertrag und Stromverbrauch gesteigert werden kann, ohne dass es zu Komforteinbussen der Nutzer kommt. Mit dieser Regelung wird das Netz entlastet, indem sich die Einspeisung in das Netz und der Bezug aus dem Netz reduzieren. Es stellt sich die Frage, ob diese Laufzeitbeschränkung auch bei den Bauweisen massiv und leicht funktioniert und ob noch kürzeren Laufzeiten möglich sind. Je kürzer die mögliche Laufzeit mit gleichzeitiger Beschränkung auf Tag-Stunden ohne Komforteinbusse ist, desto höher ist der Eigenverbrauch und desto geringer die Netzinteraktion. Die Grenzen der Laufzeitbeschränkung werden mit einer Parameterstudie mit Hilfe dynamischer thermischer Gebäudesimulationen untersucht.

Das reale Gebäude ist ein "leichter" Massivbau mit Aussenwänden aus Porenbeton und Zwischendecken und Dach aus Beton. Es umfasst drei Wohnungen, genügt dem MINERGIE-P Standard und ist damit sehr gut gedämmt. An Hand von Messwerten der Temperaturfühler in den Räumen "Wohnen" in jeder der drei Wohnungen und dem Heizwärmebedarf wird das thermische Simulationsmodell für die reale Bauweise mit einer Wärmepumpenlaufzeit für den Heizbetrieb von 10-13/14-19 Uhr validiert. Anschliessend werden im Modell die Bauweise sowie die Laufzeit der Wärmepumpe variiert. Die Auswertung erfolgt über die Komfortbewertung der berechneten operativen Temperaturen jeweils in dem Raum "Wohnen" jeder Wohnung:

- SIA 180:2014: Die operativen Temperaturen müssen während der gesamten Nutzungszeit in dem Bereich von 20.5 - 24.5°C liegen, wenn der gleitende Mittelwert der Aussenlufttemperatur über 48 Stunden $\leq 12^{\circ}\text{C}$ ist.
- SN EN ISO 7730:2006: Der zulässige Bereich der operativen Temperaturen wird in die Komfortklasse A ($22 \pm 1^{\circ}\text{C}$), B ($22 \pm 2^{\circ}\text{C}$) und C ($22 \pm 3^{\circ}\text{C}$) eingeteilt.

Die erreichten Komfortwerte unter Berücksichtigung der verschiedenen Bauweisen und Laufzeiten sind in unten stehender Tabelle für die Bedingungen des Betrachtungszeitraums 10.02.-11.03.2013 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Bauweisen "real" und "massiv" in den einzelnen Wohnungen dieselbe Verteilung in die Komfortklassen nach SIA 180 bzw. SN EN ISO 7730 aufweisen und deutlich unkritischer bzgl. der Laufzeitbeschränkung sind, als der Leichtbau. Die am realen Gebäude vorgenommene Laufzeitbeschränkung ist in der Bauweise "leicht" nicht zulässig.

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	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Mieter des untersuchten Gebäudes sind mit den Temperaturen in ihren Wohnungen, trotz Beschränkung der Wärmepumpenlaufzeit, sehr zufrieden. Leider liegen keine Messungen der operativen Temperaturen zum Vergleich vor.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, 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. Soll ohne zusätzliche gebäudetechnische Einrichtungen mit kurzen Laufzeiten der Wärmepumpe in den Tag-Stunden die Gleichzeitigkeit erhöht werden, muss das Gebäude eine energetische Flexibilität aufweisen, die im Wesentlichen auf den folgende drei Parameter basiert:

- Sehr gut gedämmtes Gebäude Geringer Wärmeverlust
- Hohe Wärmespeicherfähigkeit In Verbindung mit der guten Dämmung langsame Temperaturabnahme zwischen den Betriebsintervallen
- Suffiziente Nutzer Anspruch an das Niveau der operativen Temperatur nicht zu hoch und Bereitschaft, die Kleidung für kurze Zeiten anzupassen

In Hinblick auf die Energiestrategie 2050 und der damit zunehmenden, naturgemäss aber stark fluktuierenden Einspeisung von Sonnen- und Windenergie in das öffentliche Stromnetz kommt der energetischen Flexibilität von Gebäuden eine verstärkte Bedeutung zu. Gebäude, die nur kurze Wärmepumpenlaufzeiten benötigen, können dem Netz Regelleistung zur Verfügung stellen.

Die energetische Flexibilität zur Erhöhung der Gleichzeitigkeit des Eigenverbrauchs bzw. zum Anbieten von Regelleistung bedingt, dass künftig die Wärmebereitstellung vermehrt in Blockzeiten erfolgt und damit die operativen Temperaturen im Gebäude einer grösseren Schwankungsbreite unterworfen sind, als es bei einer kontinuierlichen Beheizung rund um die Uhr der Fall ist. Dies muss jedoch auch im Normenwerk bzgl. der Anforderungen für Behaglichkeit berücksichtigt werden. Die aktuellen Anforderungen der SIA 180:2014 an die operativen Temperaturen schränken die energetische Flexibilität stark ein. Es ist zu diskutieren, wie die SIA 180 im Sinne der Energiestrategie 2050 praxisgerecht weiter entwickelt werden kann. Aus den Ergebnissen dieses Projekts werden folgende Punkte abgeleitet, die im Zusammenhang mit der energetischen Flexibilität und normativen Anforderungen an die Behaglichkeit neu diskutiert werden müssen:

- Niveau und Breite des zulässigen Temperaturbands der operativen Temperatur
- Zeitlich begrenzte Ausnahmen vom erlaubten Temperaturband
- Abstimmung mit anderen Normen bzgl. Anforderungen an die Behaglichkeit.

2 Summary

The P&D project "Apartment Building with E-Car in Ruppertswil" shows that the self-consumption can be increased without loss of comfort by limiting the run-time of the heat pump to daytime hours between 10 am and 7 pm. The imposing of this schedule decreases the grid interaction of the building. Interesting questions that arise are e.g. if such run-time limitations can also be used with a heavy (concrete) and a lightweight (wood) construction and if further reduction of the run-time is possible. Reducing run-time even more would further increase self-consumption and reduce grid interaction. The impact of the thermal weight of the construction and limitations of run-time reduction are investigated by transient thermal building simulation.

The real building can be viewed as a "light" heavyweight construction. It features external walls in lightweight concrete and ceilings/floors as well as a flat roof in standard concrete. The building comprises three apartments and is built to MINERGIE-P Standard, which means it has a very high level of thermal insulation. The simulation model with constructions "as built" is calibrated based on measurement values from temperature sensors in the living rooms of all three apartments. Also, the measured heating demand is used for model calibration. Calibration considers a limited run-time of the heat pump between 10 am through 1 pm and 2 pm through 7 pm. Subsequently, the constructions of the simulation model are changed to "heavyweight" and "lightweight" respectively. Each of the constructions is also simulated with further limited run-times of the heat pump. Simulation results are evaluated based on thermal comfort criteria in the living rooms of each apartment:

- SIA 180:2014: The Operative Temperature must be between 20.5 - 24.5°C during occupied hours if the 48-hour running average of the ambient temperature is $\leq 12^\circ\text{C}$, which is the case, here.
- SN EN ISO 7730:2006: The Operative Temperature must be in an interval according to the desired comfort class A ($22 \pm 1^\circ\text{C}$), B ($22 \pm 2^\circ\text{C}$) or C ($22 \pm 3^\circ\text{C}$).

The following table shows resulting comfort class values for the considered construction types and run-time constraints. All values given are for the simulation period used, which is from February 10th, 2013 to March 11th 2013. It can be seen that for the construction types "real" and "heavyweight" no differences in resulting thermal comfort can be found. This is true for both comfort metrics given above. Construction types "real" and "heavyweight" show good robustness in regard to the limitation of the run-time of the heat pump. The construction type "lightweight" can not be used with limited run-times of the heat pump without a significant drop in thermal comfort as defined by the metrics used.

heat pump run-time schedule	"as build"			"heavyweight"			"lightweight"				
	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	-	-	-		-	-	-		-	-	-

The occupants of the building reported that they have been very happy with thermal comfort in their apartments notwithstanding the limited run-time of the heat pump. Sadly, however, no measurement values of Operative Temperature are available.

The results show that regardless of a very high level of thermal insulation a sufficient amount of thermal storage capacity is necessary in order to be able to limit run-times of the heat pump to daylight hours without unduly compromising thermal comfort. To achieve the goal of increasing self-consumption by limiting the run-time of heat pumps without additional HVAC components, following parameters are paramount:

- Very high level of thermal insulation Low heat loss during off-times of the heat pump
- Fairly high thermal storage capacity Combined with high level of thermal insulation this avoids large temperature drops during off-times of the heat pump
- Non-demanding occupants Expectations in regard to Operative Temperature should be moderate and occupants should be willing to adapt their level of clothing at times

In view of the Swiss “Energystategy 2050” a higher percentage of renewable energy sources will be used to supply electricity in the future. These energy sources generally have a high volatility. Therefore, energy flexible buildings, which allow for limited heat pump run-times, can offer the grid controlling power capacity.

Increasing self-consumption and/or offering the grid controlling power capacity relies on energy consumption for heating purposes during set intervals. This will lead to larger fluctuations in Operative Temperature of dwellings as compared to the status quo. These larger fluctuations in turn should be acknowledged by the appropriate standards that define thermal comfort requirements. The current requirements in regard to Operative Temperatures defined in SIA 180:2014 do not allow for such flexibility in building operation. It will be necessary to adapt the requirements in said standard in order to be able to meet the goals defined in the “Energystategy 2050”.

The results of the research described herein lead to following topics that must be revisited in regard to energy flexible buildings and thermal comfort requirements:

- level and width of the compliance interval for Operative Temperature
- possibility to fall outside the compliance interval for short time periods
- coordination between various standards in regard to comfort criteria / requirements.

3 Ausgangslage

3.1 Zielsetzung

Ein zentrales Ziel des Projektes ist es, Möglichkeiten der Beeinflussung der Interaktion eines Nullenergiegebäudes mit dem öffentlichen Stromnetz besser kennen zu lernen. Bei Nullenergiegebäuden ist die Netto-Jahresbilanz Null. Das bedeutet, dass in einem Jahr am Gebäude genauso viel Energie aus erneuerbaren Quellen gewandelt wird, wie für den Betrieb des Gebäudes aufzuwenden ist. In der Regel wird die Bilanz durch den Ertrag einer Photovoltaikanlage ausgeglichen. Je höher der zeitgleiche Verbrauch und Ertrag ist, desto weniger wird das öffentliche Stromnetz in Anspruch genommen. Folglich ist ein hoher Eigenverbrauch zur Entlastung des Netzes anzustreben.

Bei dem P&D Projekt „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil“ haben die Messwerte gezeigt, dass im Zeitraum von September 2011 bis April 2012 die Gleichzeitigkeit von Verbrauch und Ertrag in dem täglichen Zeitfenster zwischen 10-16 Uhr bei ca. 28% liegt. Ausserhalb dieses Zeitfensters ist der grösste Bezüger die Wärmepumpe mit einem Anteil von ca. 27%. Dies legt nahe, dass eine Laufzeitverschiebung der Wärmepumpe in die Tagesstunden die Gleichzeitigkeit von Elektrizitätsproduktion durch die Photovoltaikanlage und dem Gesamtverbrauch erhöhen würde. D.h. die Eigendeckung würde gesteigert und die Interaktion mit dem Netz entsprechend reduziert. Die Wärmepumpenlaufzeit wurde am realen Gebäude für den Betrieb von Heizung und Warmwasser auf 10-19 Uhr limitiert. Es konnte gezeigt werden, dass dadurch der Stromverbrauch im Winter um etwa 1'000 kWh aus den Abend- und Nachstunden in die Tagesstunden verschoben wurde. Dies führte zu einer Erhöhung der Gleichzeitigkeit von 21% (Heizperiode 11/12) auf 34% (Heizperiode 13/14) [1].

Damit in einem Gebäude solch eine Laufzeitbeschränkung ohne Komforteinbusse realisiert werden kann, muss dieses Gebäude eine entsprechende energetische Flexibilität aufweisen. D.h. es muss genügend Wärmespeicherfähigkeit und Trägheit vorhanden sein, um über eine längere Zeit ohne Heizung auszukommen.

Aus diesem Grund wird an Hand von thermischen Gebäudesimulationen untersucht, ob die am realen Gebäude durchgeführte Laufzeitbeschränkung auch in einem Massiv- und Leichtbau funktioniert und ob auch kürzere Laufzeiten ohne Komforteinbusse möglich sind. Als Basis für die Untersuchungen dient das P&D Projekt „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil“ [1][2][3][4].

3.2 Methodik

Für die Gebäudesimulation wird auf der Grundlage sämtlicher verfügbarer 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) validiert. Anfang Februar 2013 wurde die Laufzeit der Wärmepumpe für die Funktion Heizung auf das Zeitfenster 10-19 Uhr beschränkt. Gleichzeitig wurde die Laufzeit der Wärmepumpe für die Funktion Warmwasser auf die Mittagsstunden zwischen 13–17 Uhr festgelegt.

Für die Validierung des Simulationsmodells werden die an den Temperaturfühlern „Wohnen“ gemessenen Temperaturen und der gemessene Heizwärmeverbrauch je Wohnung herangezogen.

Es wird der Zeitraum 10.02.-11.03.2013 betrachtet.

4 Das Beispielgebäude

Das untersuchte Gebäude ist ein kleines Mehrfamilienhaus in Rapperswil, AG mit drei Wohnungen (Bild 1). Die beiden Wohnungen im Erd- und Obergeschoss sind identisch aufgebaut und erstrecken sich jeweils über die gesamte Etage mit Ost/West-Ausrichtung. Die Bruttowohnfläche der Wohnungen beträgt 135 m². Die Balkone sind nach Westen ausgerichtet. Im Kellergeschoss befindet sich mit einer Ostausrichtung, ein Studio mit einer Bruttowohnfläche von 50 m². Insgesamt weist das Gebäude eine Energiebezugsfläche von 320 m² auf. Grundrisse und Schnitt können dem Anhang entnommen werden.

Das Gebäude ist unter der Nummer AG-005-P-ECO von Minergie zertifiziert und 2012 mit dem Schweizer Solarpreise ausgezeichnet worden. Insgesamt wohnen vier Personen in den drei Wohnungen. In der Erdgeschosswohnung wird ein Nagelstudio betrieben.

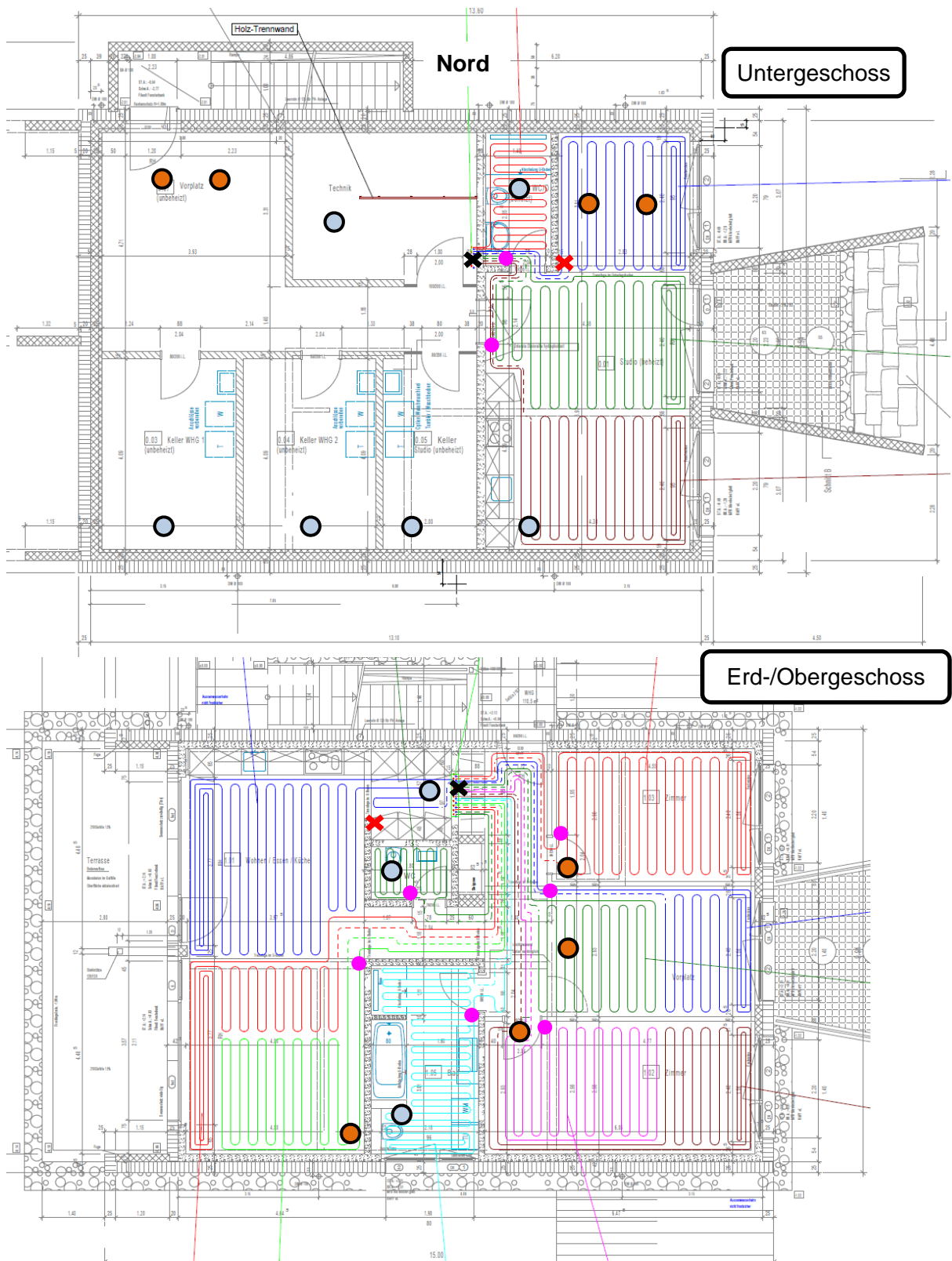


Bild 1: Ansichten des untersuchten Mehrfamilienhauses (Quelle: Setz Architektur, FHNW IEBau).

Die Wärmeabgabe der Raumheizung erfolgt über eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung. Eine Wärmepumpe Typ alpha innotec SWC 80 H/K mit 8.9 kW (B0/W35) Nennleistung erzeugt die Wärme für Warmwasser und Raumheizung. Eine 180 m tiefe Erdwärmesonde wird von der Wärmepumpe als Wärmequelle genutzt. Die erzeugte Wärme wird in einem integrierten Pufferspeicher mit 200 Litern Inhalt für die Heizung und einem Brauchwasserspeicher mit 800 Litern zwischengespeichert. Für die passive Kühlung kann die Erdwärmesonde über einen Wärmetauscher direkt an den Fussbodenkreis gekoppelt werden. Diese Funktion ist derzeit jedoch nicht aktiviert und wird daher nicht genutzt. Eine mechanische Lüftungsanlage der Firma Drexel & Weiss, Typ Topo mit Wärmerückgewinnung im Gegenstrom ($\eta_{WRG} = 80\%$) und einer Förderleistung von max. 120 m³/h (je Erd- und Obergeschosswohnung) bzw. max. 72 m³/h in der Untergeschosswohnung versorgt die Wohnungen mit Frischluft. Ab einer Aussenlufttemperatur grösser 20 °C wird die Zuluft über einen Wärmetauscher an der Erdwärmesonde gekühlt.

Der Lageplan der Fussbodenheizung, die Positionen der Thermostatventile für die raumweise Heizungsregelung, die Position der Temperaturfühler „Wohnen“ und die Positionen der Zu- bzw. Abluft sind Bild 2 zu entnehmen.

Das Gebäude ist mit einer Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) mit 102.7 m^2 Panelfläche, bestehend aus 63 monokristallinen Modulen vom Typ Sunpower SPR-318-WHT-D sowie aus drei Wechselrichtern Typ SMA Sunny Mini Central, ausgestattet. Die Panele sind nach Süden mit einer Neigung von 10° ausgerichtet. Die Nenn-Leistung der PV-Anlage liegt bei 20 kW_p , es wird mit einem Jahresertrag von rund $18'000 \text{ kWh/a}$ gerechnet.



- Raumtemperaturregler für Heizung
✗ Erfassung Temperatur „Wohnen“
✗ Wärmemengenzähler pro Wohnung
- Zuluft
● Abluft

Bild 2: Lageplan der Fussbodenheizung, Positionen für die Temperaturfühler „Wohnen“ und Raumluftregler für die Fussbodenheizung sowie die Positionen der Zuluftein-/Abluftauslässe (Quelle: Setz Architektur).

4.1 Monitoring

Diverse Verbrauchs-, Produktions- und Klimadaten werden mit 15-minütiger Zeitaufösung erfasst (Bild 3). Hin und wieder gibt es Ausfälle der Messdaten, die zwischen einem Zeitintervall von einem einzelnen 15-Minutenwert, ein paar Stunden bis 1.5 Tagen liegen. Da die Verbrauchs- und Produktionswerte mit dem jeweiligen aufsummierenden Zählerstand erfasst werden, gehen hier fehlende Daten nicht verloren. Der erste Messwert nach einer Datenlücke beinhaltet summarisch die Werte der Datenlücke. Damit sind Tages-, Monats- und Jahressumme korrekt. Bei Momentanwerten wie z.B. Temperatur „Raum“ und Aussenlufttemperaturen fehlen die entsprechenden Daten jedoch. Prinzipiell haben auf Monats- und Jahresbetrachtungen kurzen Ausfallzeiten keinen Einfluss, jedoch im Rahmen von detaillierten Betrachtungen, z.B. auf Stundenbasis, können auch kurze Ausfälle der Messdaten zu relevanten Datenlücken führen.

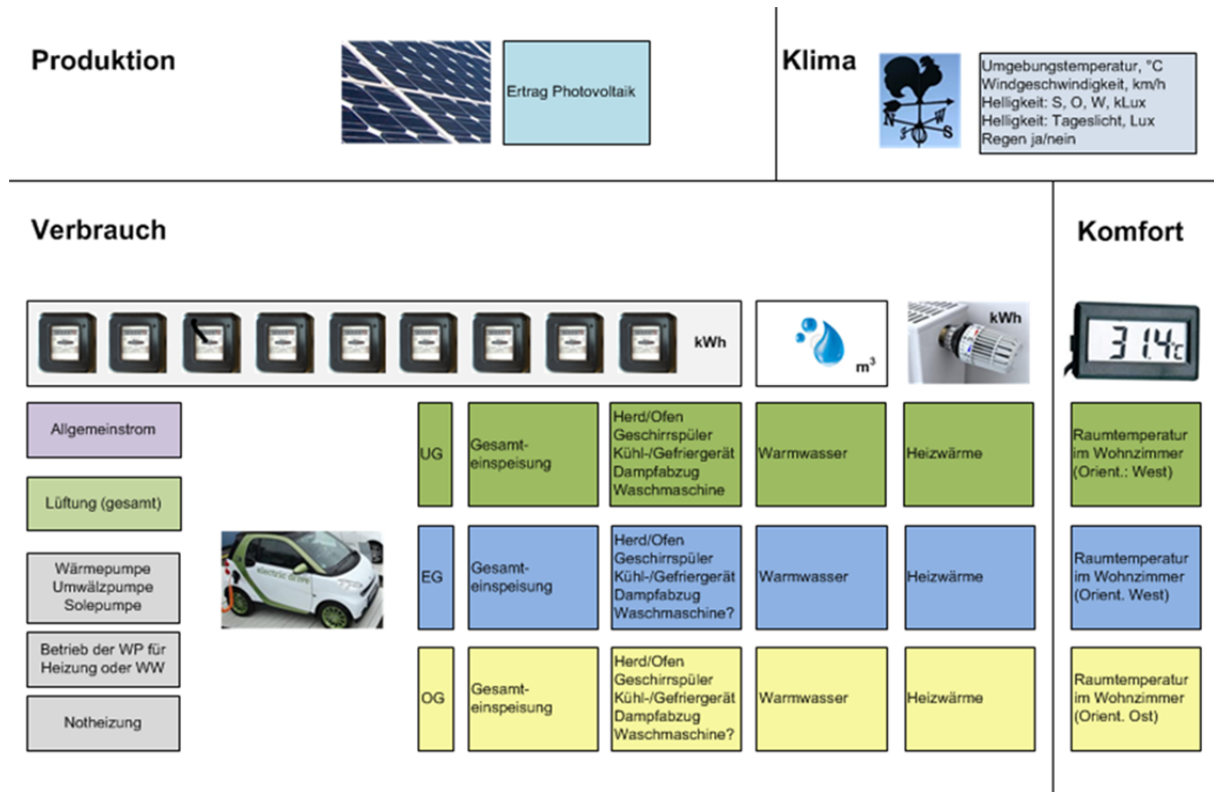


Bild 3: Verbrauchs-, Produktions- und Klimadaten, die im Monitoring erfasst werden [2].

4.2 Raumtemperaturregelung und -anzeige

In Bild 2 sind die Positionen der Raumtemperaturregler für die raumweise Heizungsregelung und der Temperaturerfassung zur Anzeige der Temperatur „Wohnen“ markiert. Beide Temperatursensoren sind komplett unabhängig voneinander. Für das Monitoring wird die Temperatur „Wohnen“ protokolliert. Informationen über die manuellen Einstellungen am Raumtemperaturregler für die raumweise Heizungsregelung liegen nicht vor. Dies hat zur Folge, dass die pro Wohneinheit protokollierte Fühlertemperatur nur sehr indirekt einen Rückschluss auf die raumweise Heizungsregelung zulässt.

Der Temperaturfühler für die Anzeige der Temperatur „Wohnen“ ist in einer kleinen Vertiefung in der Wand platziert (Bild 4). Die genaue Position des eigentlichen Temperatursensors ist nicht bekannt, da es bislang noch nicht möglich war, die Abdeckung zu entfernen. Üblich ist, dass derart positionierte Temperaturfühler eine Mischtemperatur aus Luft- und Wand-

temperatur 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 [5].



Bild 4: Abdeckung des Temperaturfühlers „OG-Wohnen“ (links) und Anzeige der gemessenen Temperatur am Temperaturfühler und der Außenlufttemperatur an der Klimastation (rechts) (Quelle: IEBau).

4.3 Materialisierung

Das Gebäude ist nach dem SIA 380/1 (2009) Nachweis in Bauweise „mittel“ erstellt. Böden, Dach und Kellerwände sind in Beton, die Aussenwände 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.

Konkrete Materialprodukte sind nicht bekannt. Um die Wärmespeicherfähigkeit abzuschätzen, werden übliche Annahmen für die Materialien getroffen. Die auf die Netto-Geschossfläche bezogene Wärmespeicherfähigkeit des Raums „Wohnen“ (EG) in der realen Bauweise wird zu $C_R/A_{NGF} = 55 \text{ Wh}/(\text{m}^2_{NGF} \text{ K})$ nach SIA 382/1 mit einer Periodendauer von 24 h bestimmt (s. Anhang 8.2). Die Anforderung an den Grenzwert nach SIA 180 ist erfüllt [6].

5 Datengrundlage

5.1 Allgemein

Die vorhandene Datenlage wird auf Verfügbarkeit und Plausibilität geprüft.

Durch das Monitoring aus dem P&D-Projekt sind folgende Daten bekannt:

- Temperatur am Temperaturfühler „Wohnen“ pro Wohnung (siehe Einschränkung Abschnitt 4.2)
- Heizwärmeverbrauch pro Wohnung
- Elektrizitätsverbrauch pro Wohnung (Gesamtverbrauch und detailliert: Kraftverbraucher, Küchenabzug, Waschen/Trocknen, Geschirrwashmaschine, Kühlschrank/Gefrierschrank)
- Aussenlufttemperatur vor Ort

Aus den Planungsunterlagen können folgende Daten entnommen werden:

- U-Werte nach SIA 380/1 Systemnachweis
- Geometrie des Gebäudes
- Aufbau der Konstruktionen
- Planungswert des mittleren Lüftungsvolumenstroms pro Wohnung
- Abstände der Heizschlangen und Anzahl Heizkreisläufe der Fussbodenheizung

Keine Informationen liegen vor für:

- Anzahl und Aufenthaltszeit von Personen in den einzelnen Räumen
- Luftwechsel in den einzelnen Räumen (Einstellung der Lüftungsanlage durch die Nutzer, manuelle Fensterlüftung durch Nutzer)
- Zu- und Ablufttemperatur und -volumenströme der mechanischen Lüftungsanlage
- Verteilung des Elektrizitätsverbrauchs von Geräten und Beleuchtung auf die einzelnen Räume.
- Betätigung des Sonnenschutzes (manuell)
- Öffnungszustand der Türen zu einzelnen Räumen
- Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe
- Thermostateinstellung für die Raumluft (Heizung) durch die Nutzer
- Verluste der Heizleitungen
- Tatsächliche Wärmespeicherfähigkeit der Konstruktion (durch den bekannten Schichtaufbau kann aber eine hinreichende Genauigkeit angenommen werden)
- Wärmespeicherfähigkeit der Innenraumausstattung

5.2 Annahmen und Festlegungen für das Simulationsmodell

Da sehr viele Daten nicht bekannt sind, müssen für das Simulationsmodell verschiedene Annahmen und Festlegungen getroffen werden:

- Es wird angenommen, dass der Sonnenschutz immer oben ist (Heizperiode).
- Es wird angenommen, dass kein energetisch relevanter Luftaustausch zwischen den Zonen 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 [7], 70 W/P in Anlehnung an [8]).
- 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 [7] ist der Anteil für Strahlung/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 (Kap. 8.3).
- Die Lüftung wird durch einen definierten, konstanten Luftwechsel über alle Räume pro Wohnung beschrieben. Dieser konstante Luftwechsel berücksichtigt
 - die wohnungsweise Regelung der Lüftungsanlage
 - den Anteil an Wärmerückgewinnung (80%) der Lüftungsanlage
 - die manuelle Fensterlüftung

5.3 Regelstrategien

Folgende Regelstrategien werden angewendet:

- Die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmepumpe sind nicht bekannt. Aus diesem Grund muss eine Annahme getroffen werden. Für die Bauweise real und der Laufzeit 10-13/14-19 Uhr wird der Wärmeerzeuger mit max. 8.9 kW so eingestellt, dass eine Vorlauftemperatur von 33-34 °C bereit steht. Mit dieser Annahme stellt sich eine mittlere Rücklauftemperatur von rund 27 °C ein. Wenn die Laufzeit kürzer wird, sinken die Vor- und Rücklauftemperaturen, da die maximale Leistung der Wärmepumpe nicht mehr ausreicht, um die entsprechende Vorlauftemperatur bereitzustellen.
- Der Luftwechsel wird pro Raum bestimmt und besteht aus einem Anteil von der Lüftungsanlage und einem Anteil durch manuelle Fensterlüftung. Lt. Planunterlagen ist der Volumenstrom der Stufe 2 als Nennvolumenstrom angegeben. Stufe 1 und Stufe 3 entsprechen $\pm 20\%$ des Nennvolumenstroms. Der Luftwechsel über die Lüftungsanlage wird entsprechend Stufe 2 berücksichtigt.

Tabelle 1: Grundlage für die Angaben des Luftwechsels.

	Erd-/Obergeschosswohnung			Untergeschosswohnung		
	Volumenstrom	Luftwechsel	Luftwechsel mit Berücksichtigung der WRG von 80%	Volumenstrom	Luftwechsel	Luftwechsel mit Berücksichtigung der WRG von 80%
	m ³ /h	1/h	1/h	m ³ /h	1/h	1/h
Stufe 1	80	0.34	0.07	48	0.50	0.10
Stufe 2	100	0.43	0.09	60	0.63	0.12
Stufe 3	120	0.52	0.10	72	0.76	0.15

Es ist davon auszugehen, dass trotz Lüftungsanlage Fenster und Türen manuell zum Lüften – wenn auch nur kurzzeitig – geöffnet werden [9].

Um die (zusätzliche) manuelle Lüftung zu berücksichtigen, werden folgende Annahmen getroffen:

- UG: die Terrassentür ist insgesamt 40 min pro Tag geöffnet
- EG/DG: die Balkontür ist insgesamt 30 min pro Tag geöffnet
- EG/DG: die Fenster in den nach Osten gerichteten Räume sind jeweils insgesamt 20 min pro Tag auf Kippstellung
- EG: Haustüre ist insgesamt 20 min pro Tag geöffnet (höhere Frequenz wegen des Nagelstudios).
- OG, UG: Haustüre ist insgesamt 5 min pro Tag geöffnet

Der Luftwechsel über die Fenster- und Türlüftung wird nach Merkblatt SIA 2023 „Lüftung in Wohngebäuden“ [10] abgeschätzt. Der kurzzeitige Luftwechsel wird auf einen kontinuierlichen Tagesluftwechsel umgerechnet und zum Luftwechsel über die Lüftungsanlage addiert (Kap. 8.5).

- Die Thermostate für die raumweise Heizungsregelung befinden sich jeweils an einer Innenwand. Aus Erfahrung ist bekannt, dass sich daher die Regeltemperatur aus einer Kombination aus Luft- und Wandtemperatur zusammensetzt. Aus diesem Grund wird in der Simulation die Heizung nach der Temperatur im raumseitigen Putz geregelt.
- Laufzeit der Wärmepumpe:
Über die Mittagszeit ist ein Einschaltfenster für die Wärmepumpe für Warmwasserbereitung eingestellt. Die Werte des Monitorings zeigen, dass je nach Warmwasserverbrauch die Wärmepumpe zwischen 0.5-2 h über Mittag läuft. Im Mittel läuft die Wärmepumpe 1 h am Tag. Daher wird in der Simulation mittags eine konstante Unterbrechung der Heizwärmebereitstellung von 1 h vorgesehen. Damit ergeben sich zwei Zeitfenster, in denen die Heizwärme bereitgestellt werden kann: 10-13 Uhr und 14-19 Uhr.

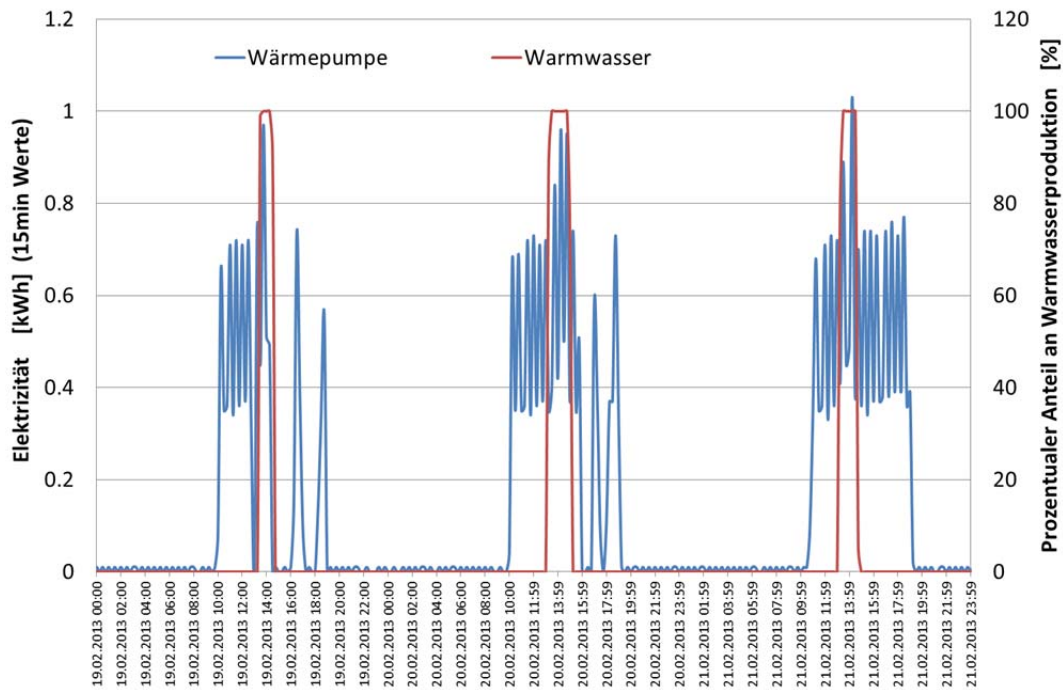


Bild 5: Beispiel für die gemessenen Laufzeiten der Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser im Zeitraum 19.2.-21.02.2013.

- Die Personenbelegung wird an Hand von der Mieterbelegung festgelegt. Im Unter- und Erdgeschoss wohnt jeweils ein Mieter, im Obergeschoss wohnen zwei Mieter. Im Erdgeschoss wird ein Nagelstudio betrieben, so dass davon ausgegangen wird, dass sich Tagsüber oft zwei Personen in der Wohnung aufhalten. Die Verteilung der Belegung sind Tabelle 2 - Tabelle 4 zu entnehmen.
 - Es wird davon ausgegangen, dass alle Mieter zwischen 23 – 7 Uhr im Haus anwesend sind.
 - Für die Untergeschosswohnung wird zwischen 7 – 23 Uhr eine Belegung von 0.5 Person angenommen.
 - In der Erdgeschosswohnung wird ein Nagelstudio betrieben. Es wird daher davon ausgegangen, dass im Tagesmittel zwischen 7 – 23 Uhr 1.25 Personen in der Wohnung anwesend sind
 - Für die Obergeschosswohnung wird zwischen 7 – 23 Uhr ebenfalls eine Belegung von 1.25 Person angenommen. Aus den Monitoring Daten wird geschlossen, dass immer ein bis zwei Personen anwesend sind.
 - Unregelmässige Abwesenheiten der Mieter bzw. mögliche Besuche durch Dritte werden nicht berücksichtigt.
- Da der Gesamtelektrizitätsbezug in den einzelnen Wohnungen über den Tag recht konstant ist, wird mit einem konstanten Stundenwert gerechnet. Die Tagessumme stimmt mit den gemittelten Messwerten überein. Die Werte werden auf die verschiedenen Räume verteilt.

Tabelle 2: Belegung Obergeschoss.

Obergeschoss		Personenbelegung nach Uhrzeit			Geräte/Bel. [W/m ²]
		0 - 7 Uhr	7 - 23 Uhr	23 - 24 Uhr	0 - 24 Uhr
Wochentag	Wohnen	0.5	0.75	0.5	1
	Flur	0.5	0.25	0.5	0.2
	Zimmer 1	0.5	0	0.5	0
	Zimmer 2	0.5	0.25	0.5	0.4
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	2	1.25	2	1.6
Samstag	Wohnen	0.5	1	0.5	2.4
	Flur	0.5	0.25	0.5	0.4
	Zimmer 1	0.5	0	0.5	0
	Zimmer 2	0.5	0.25	0.5	0.9
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	2	1.5	2	3.7
Sonntag	Wohnen	0.5	1	0.5	2.1
	Flur	0.5	0.25	0.5	0.4
	Zimmer 1	0.5	0	0.5	0
	Zimmer 2	0.5	0.25	0.5	0.8
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	2	1.5	2	3.3

Tabelle 3: Belegung Erdgeschoss.

Erdgeschoss		Personenbelegung nach Uhrzeit			Geräte/Bel. [W/m ²]
		0 - 7 Uhr	7 - 23 Uhr	23 - 24 Uhr	0 - 24 Uhr
Wochentag	Wohnen	0.25	0.25	0.25	1.4
	Flur	0.25	0.5	0.25	0.3
	Zimmer 1	0.25	0	0.25	0
	Zimmer 2	0.25	0.5	0.25	0.5
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	1	1.25	1	2.2
Samstag	Wohnen	0.25	0.25	0.25	1.5
	Flur	0.25	0.5	0.25	0.3
	Zimmer 1	0.25	0	0.25	0
	Zimmer 2	0.25	0.5	0.25	0.6
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	1	1.25	1	2.4
Sonntag	Wohnen	0.25	0.25	0.25	1.1
	Flur	0.25	0.5	0.25	0.2
	Schlafen 1	0.25	0	0.25	0
	Schlafen 2	0.25	0.5	0.25	0.4
	Bad	0	0	0	0
	WC	0	0	0	0
	Summe	1	1.25	1	1.7

Tabelle 4: Belegung Untergeschoss.

Untergeschoss		Personenbelegung nach Uhrzeit			Geräte/Bel. [W/m ²]
		0 - 7 Uhr	7 - 23 Uhr	23 - 24 Uhr	0 - 24 Uhr
Wochentag	Wohnen	1	0.5	1	1.9
	Bad	0	0	0	0
	Summe UG	1	0.5	1	1.9
Samstag	Wohnen	1	0.5	1	1.8
	Bad	0	0	0	0
	Summe UG	1	0.5	1	1.8
Sonntag	Wohnen	0.5	0.25	0.5	1.4
	Bad	0	0	0	0
	Summe UG	0.5	0.25	0.5	1.4

5.4 Klimarandbedingungen

Die Klimadaten – globale und diffuse Strahlung sowie Windgeschwindigkeit und -richtung – basieren auf Daten der Klimastation Buchs-Aarau (ca. 3 km vom Gebäudestandort entfernt). Die Aussenlufttemperatur wird vor Ort am Gebäude gemessen und in den Klimadatensatz integriert.

Der benötigte Jahresdatensatz wird aus den Jahren 2012 und 2013 zusammengesetzt. Da der betrachtete Zeitraum im Februar/März 2013 liegt und in der Simulation eine zwei-monatige Vorlaufzeit verwendet wird, werden auch die Daten von Dezember 2012 benötigt. Der Jahresdatensatz wird wie folgt zusammengesetzt: Januar-März Jahr 2013; restlichen Monate Jahr 2012.

Bild 6 zeigt für den betrachteten Zeitraum die vor Ort gemessenen Aussenlufttemperaturen – mittlere Temperatur: $1.8 \pm 4.7^\circ\text{C}$, min./max. Temperatur: $-12/17^\circ\text{C}$ – und die Globalstrahlung, gemessen an der Klimastation von Buchs-Aarau (ca. 3 km entfernt). Die Plateaus im Verlauf der Aussenlufttemperatur sind auf Messdatenausfälle zurück zu führen.

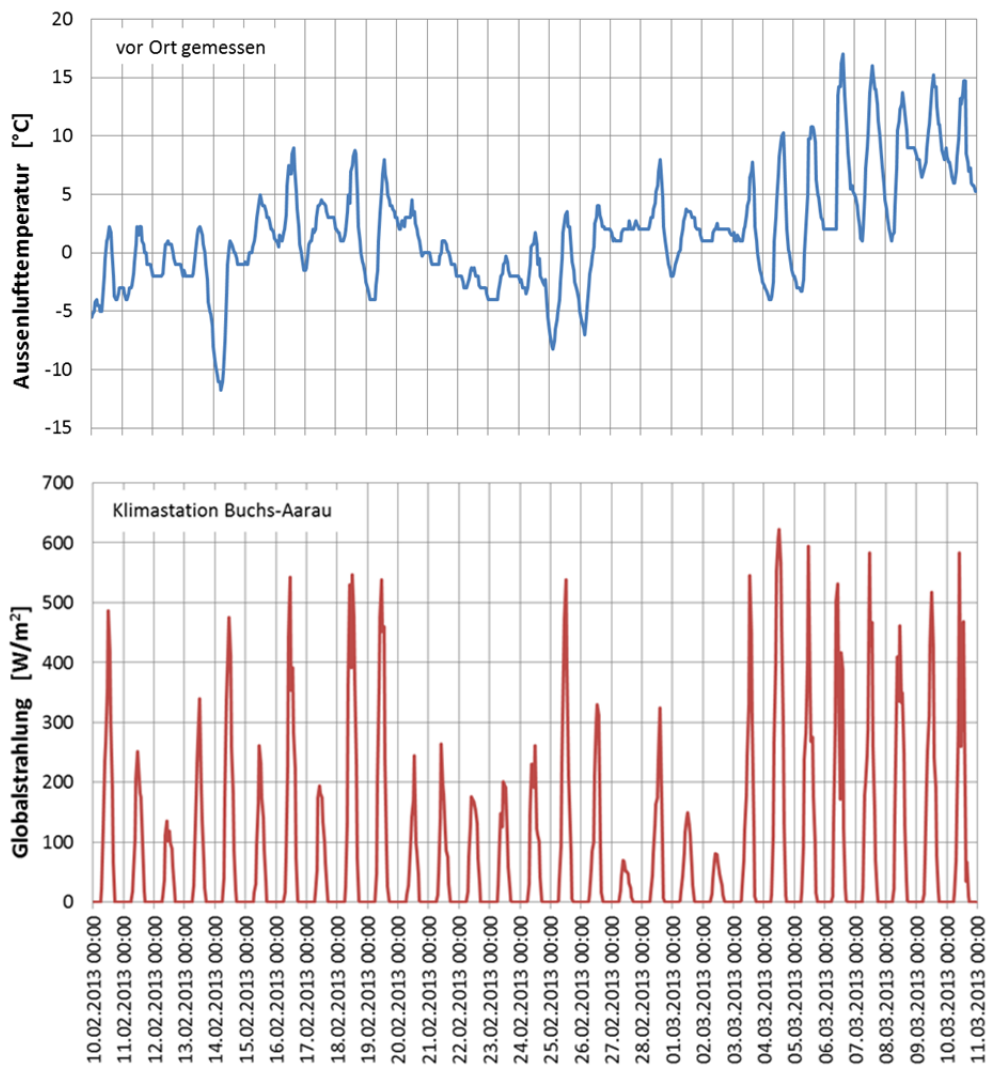


Bild 6: Aussenlufttemperaturen und Globalstrahlung für den betrachteten Zeitraum 10.02.-11.03.2013. Plateaus im Verlauf der Aussenluft weisen auf Datenausfälle hin.

5.5 Variantenbildung

5.5.1 Allgemein

Bei der Parametervariation wird nur die Konstruktion geändert sowie die Laufzeit der Wärmepumpe variiert. Alle anderen Einstellungen werden beibehalten, wie sie im validierten Modell eingestellt wurden. 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.

5.5.2 Bauweise / Konstruktionen

Für die Bauweise massiv werden übliche Wandstärken für Beton gewählt. Der Porenbeton (175 mm) der Aussenwände wird mit 250 mm Beton ersetzt sowie alle Innenwände in Beton mit 200 mm ausgeführt. Die grössere Wandstärke ist nicht aus statischen, sondern aus technischen Gründen notwendig. Bei der Bauweise leicht werden die Aussenwände über Terrain, die Geschosdecke EG/OG, das Dach sowie die Innenwände in Leichtbauweise dargestellt. Das Untergeschoss und die Geschosdecke 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. Bild 7 zeigt schematisch die Konstruktion für die drei Bauweisen. Der genaue Aufbau ist Kapitel 8.1 zu entnehmen.

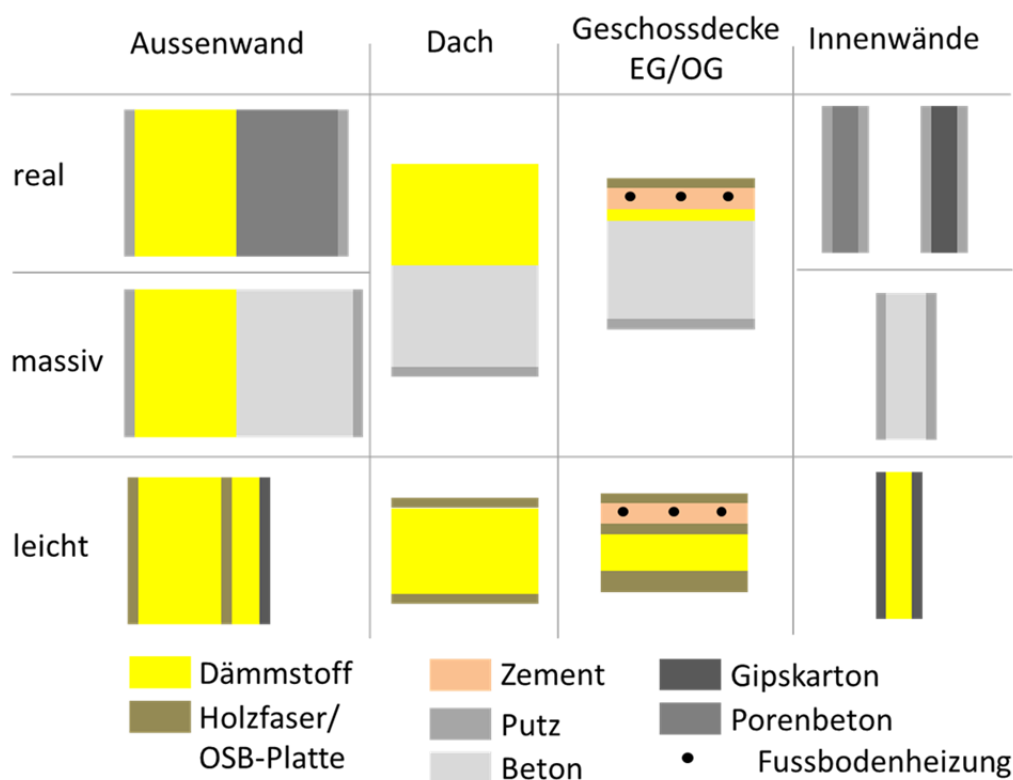


Bild 7: Schematischer Aufbau der Konstruktionen für die drei Bauweisen.

In Tabelle 5 ist die Wärmespeicherfähigkeit berechnet nach SIA 382/1 des gesamten, beheizten Gebäudebereiches für die verschiedenen, untersuchten Bauweisen zusammengestellt. Wie erwartet zeigt sich, dass die Wärmespeicherfähigkeit des realen Gebäudes deutlich näher an der Massiv- als an der Leichtbauweise liegt.

Tabelle 5: Wärmespeicherfähigkeit der beheizten Gebäudebereiche berechnet aus den einzelnen Räumen nach SIA 382/1 (Periodendauer: 24 h) und den verschiedenen Bauweisen.

	C_R/A_{NGF} [Wh/(m ² _{NGF} K)]	C_R [kWh/K]
real	63	17
massiv	79	21
Leicht	40	11

5.5.3 Laufzeitbeschränkung

Die Laufzeitbeschränkung für Heizwärme der Wärmepumpe wird 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. In Tabelle 6 ist eine Übersicht über die untersuchten Laufzeiten gegeben.

Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Laufzeiten der Wärmepumpe zu Heizzwecken.

Laufzeit	max. Stunden
10-13/14-19 Uhr	8 h
10-13/14-18 Uhr	7 h
10-13/14-17 Uhr	6 h
10-13/14-16 Uhr	5 h

5.6 Zonierung des thermischen Modells

Das Simulationsmodell besteht aus 15 thermischen Zonen. Je Wohnung 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 8).

Die Verschattung der Fenster durch den vorgelagerten Balkon und das vorgezogene Dach, die tiefen Fensterlaibungen sowie im Kellergeschoss durch die Gartensituation wird bei der Simulation berücksichtigt. Ebenfalls wird die Verschattung durch das Nachbarhaus auf der Südseite berücksichtigt (Bild 9).



Bild 8: Aufteilung der thermischen Zonen, Foto und Modell des Gebäudes.



Bild 9: Lage des Nachbargebäudes auf der Südseite. (Quelle: maps.google.ch).

5.7 Simulationsprogramm

Zur Durchführung der Simulationsrechnungen wird die an der Universität Strathclyde entwickelte Simulationsumgebung „ESP-r“ [11] eingesetzt.

5.8 Auswertung

Die Validierung der Simulation erfolgt durch den Abgleich der gemessenen Temperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ und dem gemessenen Heizwärmebedarf pro Wohnung. Die Temperaturfühler befinden sich in einer Unterputzdose in einer Innenwand (Bild 2). Für das Simulationsmodell wird angenommen, dass der Temperaturfühler zu 33% die Lufttemperatur und zu 67% die Wandtemperatur (Putztemperatur) misst (siehe Abschnitt 4.2).

Bei dem Vergleich der Varianten werden die berechneten operativen Temperaturen für die Räume "Wohnen" und der berechnete Heizwärmebedarf herangezogen. Die operativen Temperaturen werden anhand von den Komfortkriterien nach SIA 180 [6] und SN EN ISO 7730 [12] bewertet.

6 Resultate

6.1 Validierung

Die Validierung des Modells erfolgt für die Bauweise real und einer Wärmepumpenlaufzeit von 10-13/14-19 Uhr für Heizwärme. Der berechnete Heizwärmebedarf wird dem gemessenen Heizwärmeverbrauch gegenübergestellt (Tabelle 7). Der Wärmehähler für den gemessenen Heizwärmeverbrauch registriert die Nutzwärme, die in die einzelnen Wohnungen abgegeben wird. Die Zähler befinden sich in jeder Wohnung (Bild 2). Der Heizwärmebedarf wird aus dem Volumenstrom der Fussbodenheizung und der Vor- und Rücklauftemperatur pro Wohnung ermittelt. Mit den getroffenen Annahmen kann der Heizwärmeverbrauch mit sehr guter Genauigkeit in der Simulation nachvollzogen werden.

Tabelle 7: Gemessener Heizwärmeverbrauch und Heizwärmebedarf für den betrachteten Zeitraum 10.02.-11.03.2013 (Bauweise real, 10-13/14-19 Uhr).

	Heizwärme- verbrauch [kWh]	Heizwärme- bedarf [kWh]	Abw.
Untergeschoss	311	306	-2%
Erdgeschoss	580	560	-3%
Obergeschoss	728	710	-2%
Total	1'619	1'576	-3%

Die gemessenen und berechneten mittleren Temperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ sind für den betrachteten Zeitraum in Tabelle 8 zusammengestellt. Den zeitlichen Verlauf der Temperaturen zeigt Bild 10. Die gemessenen Temperaturen können mit den getroffenen Annahmen in der Simulation hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung wie der Heizwärmebedarf mit sehr guter Genauigkeit nachvollzogen werden. Im OG und UG stimmen auch die zeitlichen Verläufe überwiegend gut überein. Im EG sind die Abweichungen im zeitlichen Verlauf grösser, die Ursache ist unklar, jedoch kann mit der verfügbaren Information keine weitere Annäherung erreicht werden. Da der Mittelwert und die Standardabweichung der Temperatur gut übereinstimmen und der Heizwärmebedarf ebenfalls, wird die Abweichung im zeitlichen Verlauf jedoch als akzeptabel gewertet. Das Simulationsmodell ist damit validiert.

Tabelle 8: Mittlere gemessene und berechnete Raumlufttemperaturen am Temperaturfühler „Wohnen“ für den betrachteten Zeitraum 10.02. - 11.03.2013 (Bauweise real, 10-13/14-19 Uhr).

	Mittlere Temperatur am Temperaturfühler „Wohnen“ [°C]	
	gemessen	berechnet
Untergeschoss	21.9 ± 0.44	21.9 ± 0.41
Erdgeschoss	21.6 ± 0.34	21.7 ± 0.42
Dachgeschoss	22.8 ± 0.36	22.9 ± 0.37

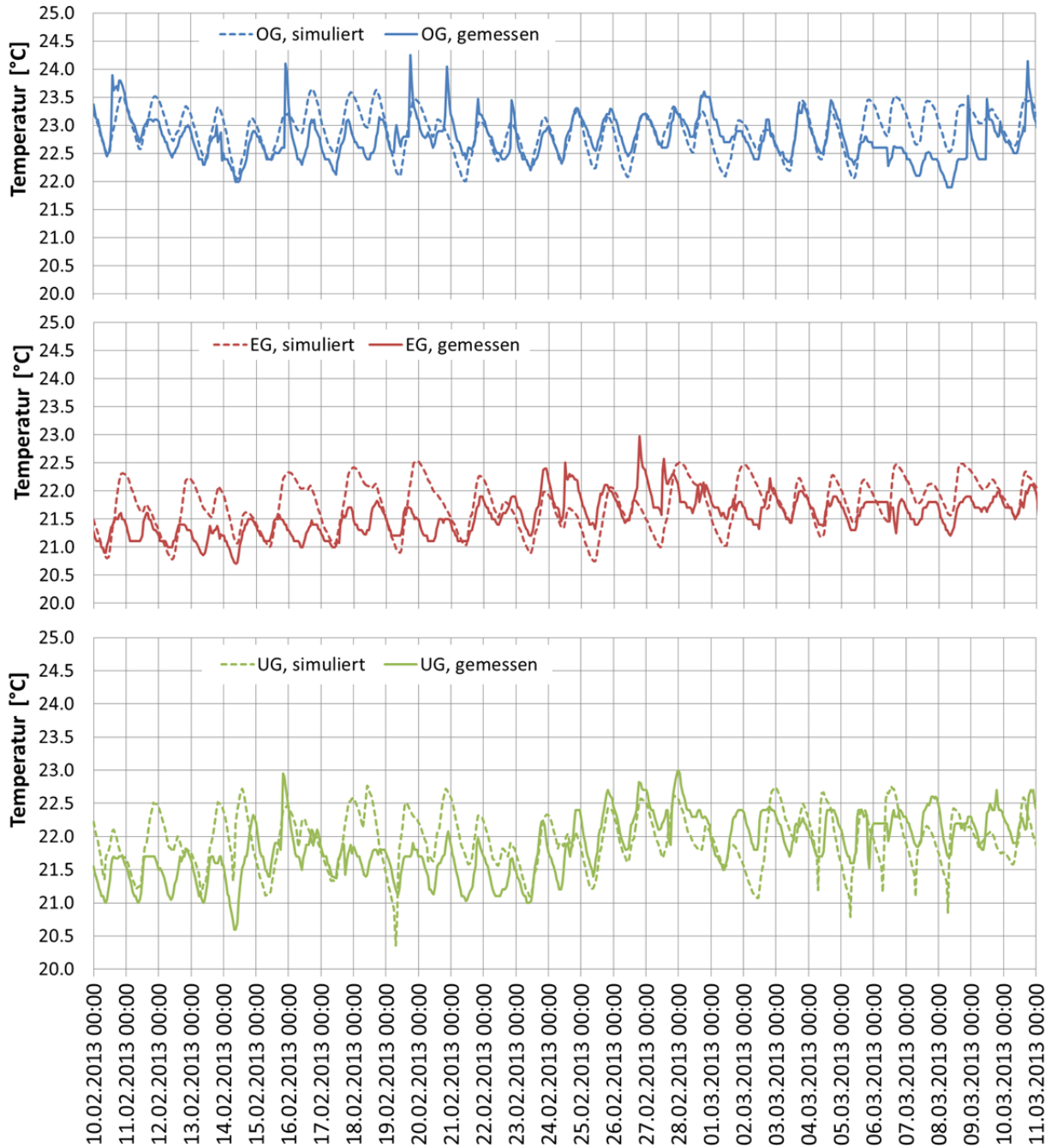


Bild 10: Gemessene und berechnete Temperatur am Temperaturfühler „Wohnen“ im Unter-, Erd- und Obergeschoss (10.02.-11.03.2013, Basis: Stundenwerte). Plateaus in den Messwerten weisen auf einen Datenausfall hin.

6.2 Varianten

6.2.1 Allgemein

Der Vergleich der Varianten erfolgt über eine Betrachtung der operativen Temperaturen im Raum "Wohnen" der drei Wohnungen. Bild 11 zeigt die berechneten operativen Temperaturen sowie die gemessenen und berechneten Temperaturen am Temperaturfühler. Die operativen Temperaturen zeigen eine deutlich grössere Schwankungsbreite als die Fühlertemperaturen. Die Mittelwerte der operativen Temperaturen – UG $21.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$, EG $21.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$, EG $22.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$ – liegen um ca. 0.4 K unterhalb der gemessenen und berechneten mittleren Temperaturen an den Temperaturfühlern (Tabelle 8). Der Grund hierfür ist, dass in der Innenwand, in der die Fühler angeordnet sind, im Mittel die Temperatur höher ist und die Schwankungen im Tagesverlauf weniger stark ausgeprägt sind, als bei den operativen Temperaturen, die sich aus der Raumlufttemperatur und den raumseitigen Oberflächentemperaturen zusammensetzt.

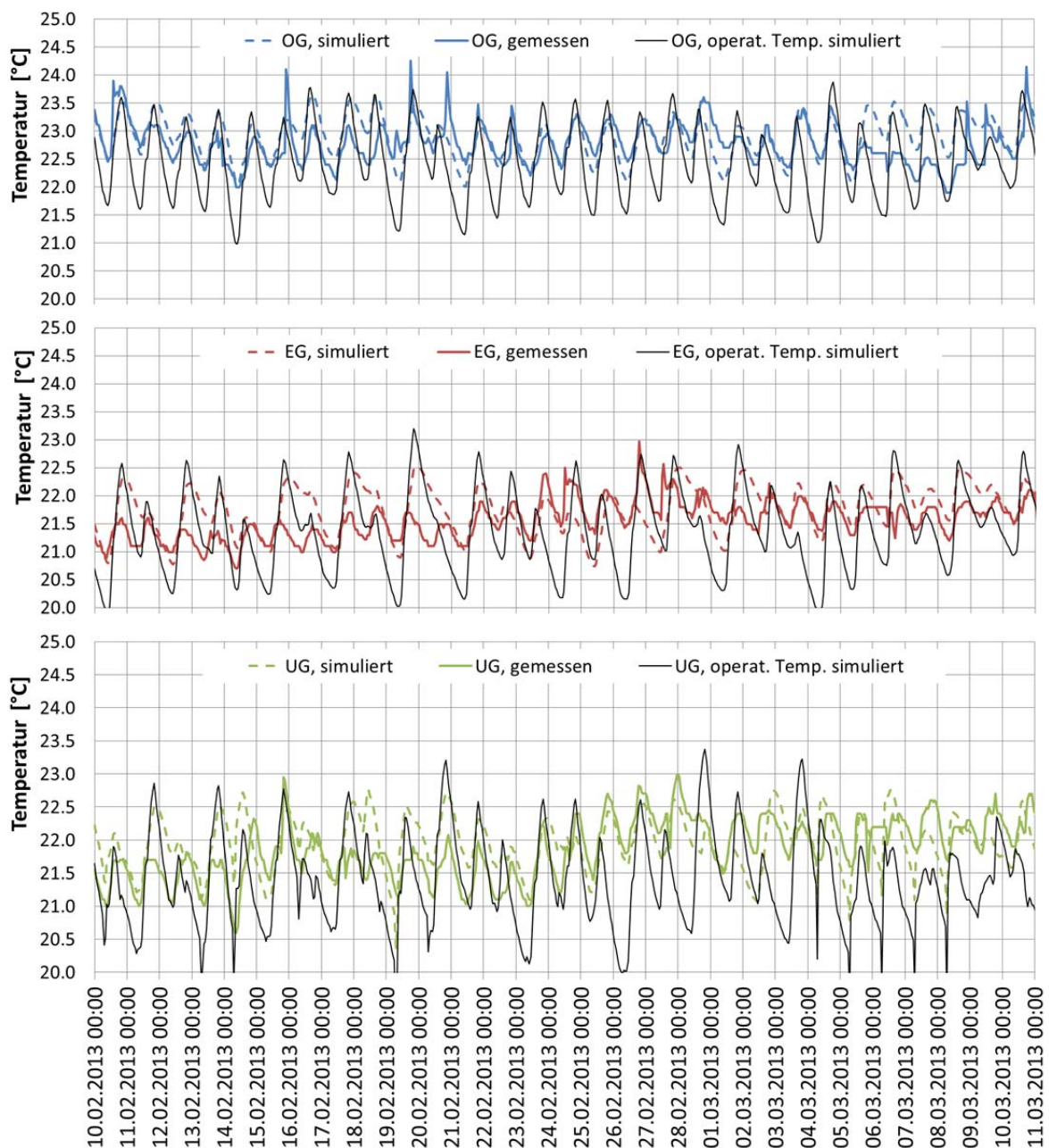


Bild 11: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperatur am Temperaturfühler „Wohnen“ mit den berechneten operativen Temperaturen (Bauweise real, 10-13/14-19 Uhr).

Die Auswertung der Varianten erfolgt im Wesentlichen über eine Betrachtung der Summenhäufigkeit der operativen Temperatur in den einzelnen Wohnungen sowie über die Komfortbedingungen gemäss den Normen SIA 180 [6] und SN EN ISO 7730 [12]. Die Komfortanforderungen lauten:

- SIA 180: Die operativen Temperaturen müssen während der gesamten Nutzungszeit in dem Bereich von 20.5 - 24.5°C liegen, wenn der gleitende Mittelwert der Aussenlufttemperatur über 48 Stunden $\leq 12^{\circ}\text{C}$ ist. Dies ist hier der Fall.
- 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 Kap. 5.5.2 mit je vier Laufzeitintervallen gemäss Tabelle 6. Die drei Wohnungen des betrachteten Gebäudes werden getrennt diskutiert und es liegen damit insgesamt 36 Fälle vor.

6.2.2 Operative Temperaturen

Die Summenhäufigkeit der Stundenwerte der 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 12 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 Komfort-Klassen A-C gemäss SN EN ISO 7730 gegeben. Der obere und untere Grenzwert gemäss SIA 180 ist jeweils als rote Linie in die Grafiken eingetragen. Eine genauere Analyse des thermischen Komforts findet sich in Abschnitt 6.2.3.

Die einzelnen Zeilen stehen für die verschieden langen Laufzeiten der Wärmepumpe gemäss Tabelle 6. 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 Wohnungen 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 der Oberschosswohnung in der Bauweise „real“ liegen die Mittelwerte der operativen Temperatur für die verschiedenen Laufzeiten sehr nahe beieinander. Bei der Obergeschosswohnung ist eine Abnahme des Mittelwertes um 0.6 K zu verzeichnen. Trotzdem liegt die mittlere Temperatur in dieser Wohnung 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 der Wohnung im UG in mindestens 95% der Stunden im Beobachtungszeitraum für alle Laufzeitintervalle ausser dem kürzesten oberhalb von 20 °C. Bei der Obergeschosswohnung ist dies nur bei der längsten Laufzeit von 10-13/14-19 Uhr der Fall. Die Temperatur in der EG-Wohnung sowie für die kürzeren Laufzeiten in der OG-Wohnung liegen bis zu 50% der Stunden im Betrachtungszeitraum unterhalb von 20 °C. Die Wohnung im UG ist allerSNgs auch in der Bauweise „leicht“ eher als „massiv“ einzustufen.
- Bei dem kürzesten betrachteten Laufzeitintervall von 10-13/14-16 Uhr liegen die Temperaturen in allen Wohnungen bei allen Bauweisen zum grössten Teil der Stunden des Betrachtungszeitraums unter 20 °C. Diese Laufzeit ist damit bei keiner Bauweise möglich.

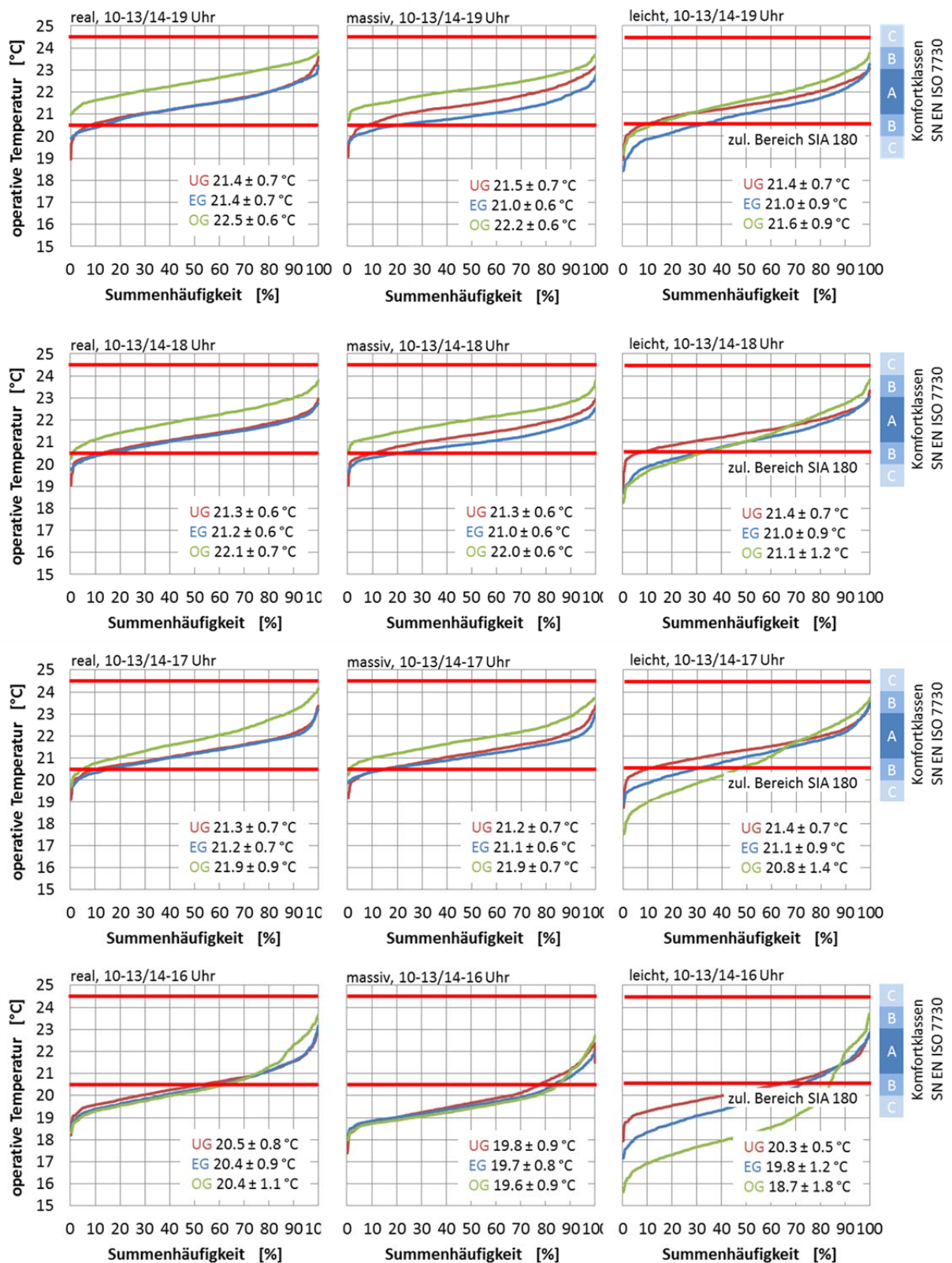


Bild 12: Summenhäufigkeit, Mittelwert und Standardabweichung der operativen Temperaturen in den Räumen „Wohnen“ der Unter-, Erd- und Obergeschosswohnung für die Bauweisen real, massiv und leicht bei verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe (Betrachtungszeitraum: 10.2.-11.03.2013).

Die berechneten Temperaturen am Temperaturfühler zeigen die gleiche Tendenz wie die berechneten operativen Temperaturen (Kap. 8.6). Mit Verkürzung der Laufzeit weichen die berechneten mittleren Temperaturen am Temperaturfühler "Wohnen" immer stärker von der jeweiligen mittleren Referenztemperatur – hier die gemessenen Temperaturen am Temperaturfühler "Wohnen" – ab.

6.2.3 Komfort

Die höchste operative Temperatur 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 9 zusammengefasst dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bauweisen "real" und "massiv" dieselbe Verteilung der Komfortklassen in den einzelnen Wohnungen aufweisen.

Tabelle 9: Komfoteinstufungen nach SIA 180 und den Komfortklassen A, B und C nach SN EN ISO 7730 unter Berücksichtigung der Bauweise, Laufzeit der Wärmepumpe und maximal und minimal auftretenden operativen Temperaturen für die Räume "Wohnen" (10.02.-11.03.2013).

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	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden

- Die Obergeschosswohnung in den Bauweisen "real" und "massiv" weist den höchsten thermischen Komfort auf. Für die längste Laufzeit von 10-13/14-19 Uhr kann diese Wohnung als einzige die neuen Anforderungen gemäss SIA 180:2014 erfüllen!
- Bei der kürzesten Laufzeit von 10-13/14-16 Uhr wird in keiner Wohnung ein normkonformer thermischer Komfort erreicht.
- Werden kurzzeitig, d.h. $\leq 5\%$ der Stunden (Bild 12), 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 auf Grund der beschränkten Wärmepumpenlaufzeit in den Morgenstunden (ca. 5-10 Uhr) auf. Die erhöhte Gleichzeitigkeit muss ggf. mit einer angepassten Kleidung „erkaufte“ 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 Wohnungen, insbesondere im Unter- und Erdgeschoss, angehoben werden. Dies widerspricht bei diesem Gebäude den Wünschen der Nutzer.

6.2.4 Auslastung der Heizkreise in den Räumen Wohnen

Die Auslastung des Heizkreises soll Aufschluss darüber geben, in wie weit die der Wärmepumpe für Heizzwecke zur Verfügung gestellte Laufzeit tatsächlich genutzt wird. Für die verschiedenen Laufzeiten wird hierfür der verwendete Anteil am maximal möglichen Massenstrom infolge des "Auf/Zu"-Prinzips der Ventilstellung der einzelnen Heizkreise in den Räumen "Wohnen" verglichen (Bild 13). 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. D.h. die Ventile könnten länger geöffnet bleiben. Das Potential, um die operativen Temperaturen anzuheben, ist noch nicht ausgeschöpft.
- In 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 8, Bild 12). 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.

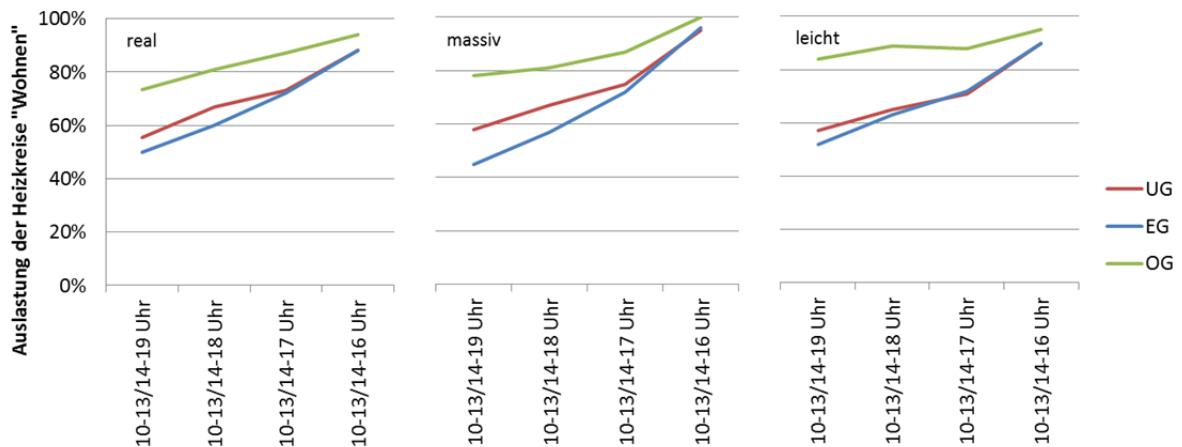


Bild 13: Anteil des Massenstroms des Heizkreises „Wohnen“ infolge der Ventilstellungen von den einzelnen Heizkreisen für alle Bauweisen und Laufzeiten (0%: Ventil geschlossen, 100% Ventil geöffnet).

6.2.5 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf ist für alle Bauweisen sehr ähnlich und sinkt leicht mit kürzer werden den Laufzeiten der Wärmepumpe ab (Bild 14). Dies korrespondiert mit den sinkenden 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 Geschosdecke 40 mm oberhalb der Betondecke, während im Leichtbau zusätzlich ein 200 mm starkes Material als Masse in der Leichtbaudecke vorgesehen ist (Tabelle 11). Damit verändert sich die Dämmeigenschaft der Zwischendecke. Im Leichtbau wird die Erdgeschosswohnung thermisch 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 in der Erdgeschosswohnung der Heizwärmebedarf und sinkt in der Obergeschosswohnung.

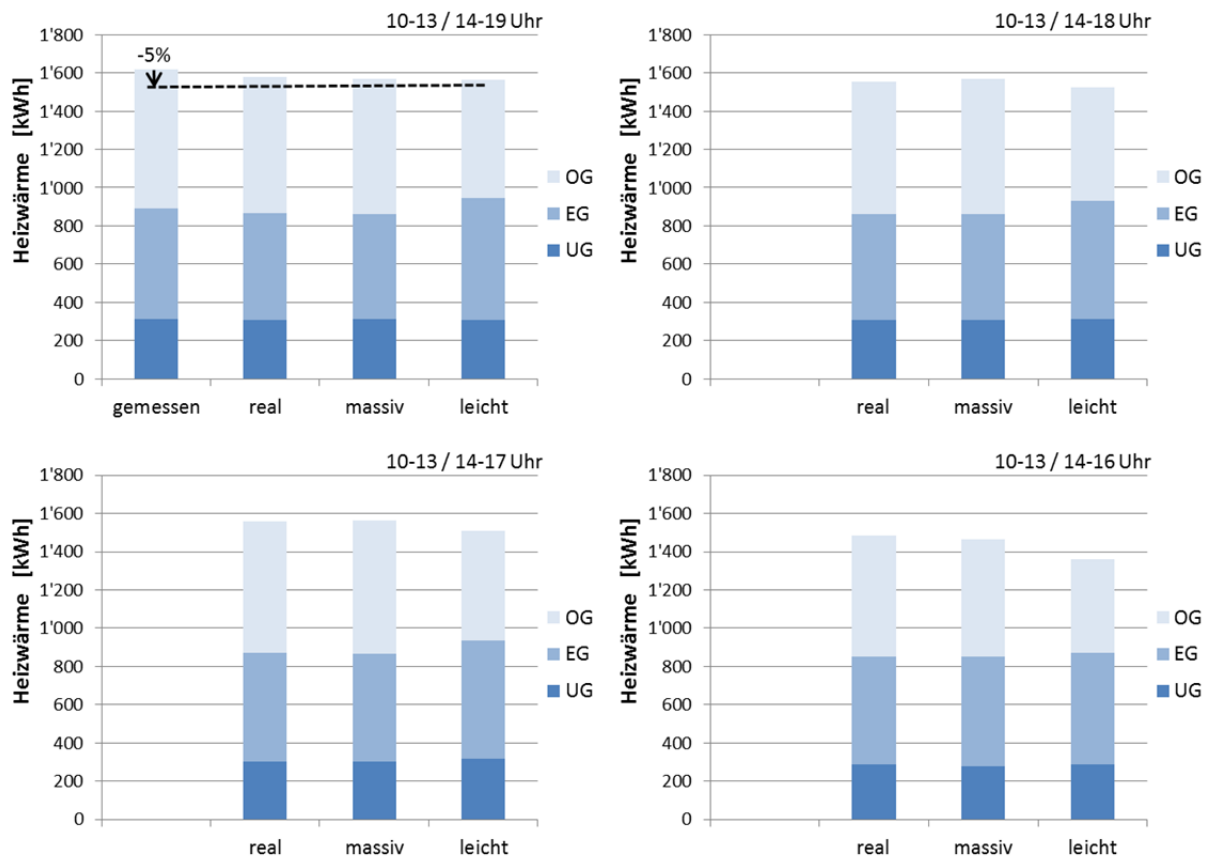


Bild 14: Heizwärmeverbrauch und Heizwärmebedarf für das Unter-, Erd- und Obergeschoss für die Bauweisen "real", "massiv" und "leicht" bei verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe.

6.2.6 Operative Temperaturen und gleitendes Mittel der Aussenlufttemperatur

In Bild 15 sind die Simulationsergebnisse für die Bauweise „real“ oben mit der längsten untersuchten beschränkten Wärmepumpenlaufzeit von 10-13/14-19 Uhr und unten mit einer zeitlich uneingeschränkten Laufzeit wiedergegeben. Aufgetragen sind die Stundenwerte der operativen Temperatur in Abhängigkeit von dem gleitenden Mittelwert der Aussenlufttemperatur über 48 Stunden gemäss SIA 180 [6]. Die beiden roten Linien kennzeichnen den nach Norm zulässigen Bereich. Dieser entspricht der um +0.5 K verschobenen Komfortklasse B gemäss [12]. Die Prozentzahl in der Legende gibt den Anteil der Stunden in der Wohnung an, in denen der zulässige Temperaturbereich nach SIA 180 unterschritten wird (eine Überschreitung erfolgt im Betrachtungszeitraum nicht). Aufgrund der vorgegebenen Laufzeitbeschränkung der Wärmepumpe treten die operativen Temperaturen unterhalb 20.5 °C immer in den Morgenstunden auf. Im Fall der bedarfsgeregelten Wärmepumpe verteilen sich die tiefsten operativen Temperaturen auf den ganzen Tag: 2 Uhr, 7 Uhr, 21 Uhr und 24 Uhr.

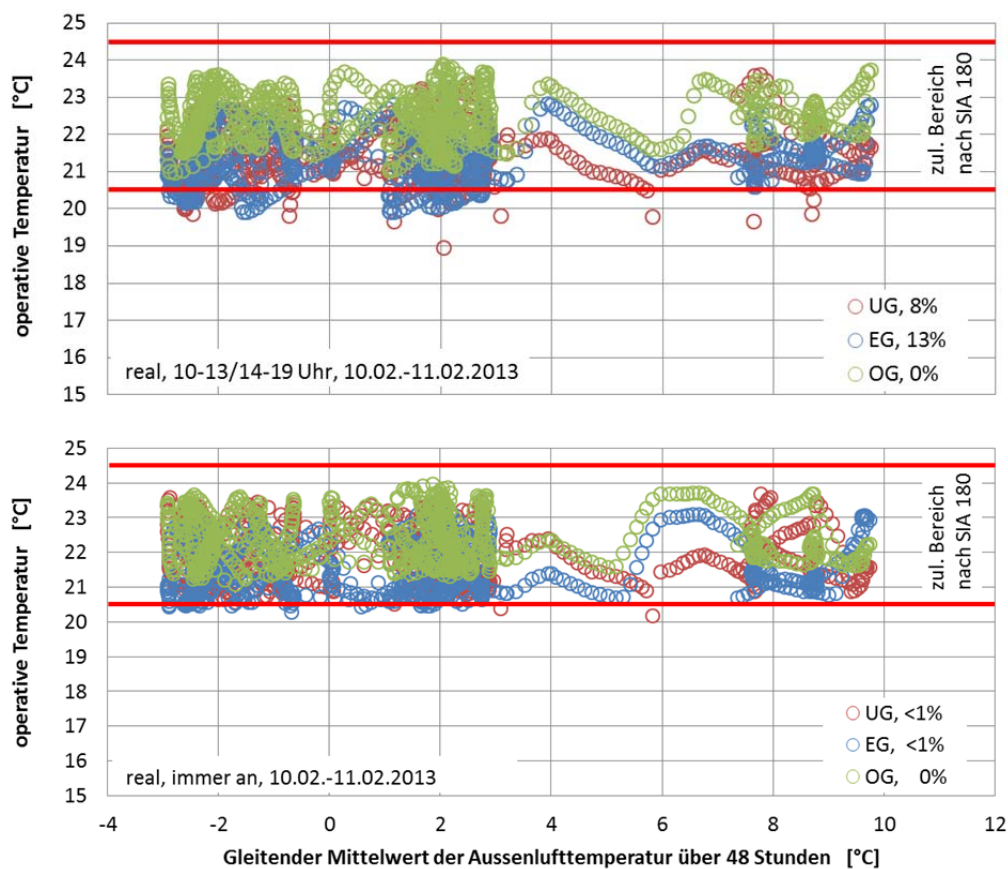


Bild 15: Verteilung der berechneten operativen Temperaturen im Raum „Wohnen“ im Unter-, Erd- und Obergeschoss für die Bauweise real in Abhängigkeit von dem gleitenden Mittelwert der Aussenlufttemperatur über 48 Stunden nach SIA 180 (oben: Laufzeit 10-13/14-19 Uhr, unten: bedarfsgeregelt).

Die neue SIA 180:2014 fordert, dass die operative Temperatur während der ganzen Nutzungszeit in dem zulässigen Bereich liegen muss. Für Wohnbauten bedeutet dies, dass in der Regel diese Bedingung 24 Stunden am Tag eingehalten werden muss. Wird dies auf das untersuchte Gebäude angewendet, erfüllen die Unter- und Erdgeschosswohnung auch mit nicht eingeschränkter Laufzeit der Wärmepumpe die Komfortkriterien nicht. Da das Ausmass der Temperaturschwankung durch den Tagesverlauf gegeben ist, müsste die mittlere operative Temperatur der Unter- und Erdgeschosswohnung angehoben werden. Dies ist zwar möglich, widerspricht jedoch den Wünschen der Mieter.

6.3 Diskussion

6.3.1 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 Heizwärmebedarfsrechnung nach SIA 380/1 auf einer operativen Temperatur – in SIA 380/1 Raumtemperatur genannt – von 20°C beruht [13]. D.h. 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 in der Realität die operative Temperatur ähnlich schwankt wie es die Simulation zeigt. D.h. kurzzeitige Unterschreitungen der Minimaltemperatur von 20°C bzw. 20.5°C werden von den Mietern 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.

6.3.2 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, kann das Gebäude flexibler reagieren. Dauer und Zeitpunkt des Energieverbrauchs für die Wärmebereitstellung kann besser an verschiedene Bedingungen angepasst werden, wie z.B. Zeiten mit Solarangebot oder Zeiten mit günstigen Stromtarifen. Beide Effekte haben einen Einfluss auf die Netzinteraktion. Wird einerseits das Solarangebot genutzt, verringert sich die Netzeinspeisung. Auf der anderen Seite kann das Gebäude mit einer Wärmepumpe Regelleistung zur Verfügung stellen, wenn das Netz Unter-/Überkapazität ausgleichen muss. In allen Fällen muss das Gebäude flexibel reagieren. 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 operativen Temperatur stark beeinflusst. In der Regel weicht diese, wie auch bei den Mietern in dem hier betrachteten Gebäude, gegenüber der operativen Temperatur von 20°C nach SIA 380/1 nach oben ab. Dies spiegelt sich in einer längeren Laufzeit der Wärmepumpe und damit in einer Zunahme des Heizwärmeverbrauchs wieder. Die Möglichkeiten für Gleichzeitigkeit und Flexibilität nehmen ab.

Die Resultate zeigen, dass auch bei dem gut gedämmten Gebäude eine hohe Wärmespeicherfähigkeit von Vorteil ist, um die Laufzeit der Wärmepumpe zu verkürzen.

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 Bereitschaft, Flexibilität bzgl. der Regelleistung des Stromnetzes zur Verfügung zu stellen, sollte immer eine positive finanzielle Auswirkung haben (z.B. günstiger Wärmepumpentarif).

Die generellen Auswirkungen von Gebäude, Nutzer und normativen Anforderungen auf die Netzinteraktion sind in Bild 16 dargestellt.

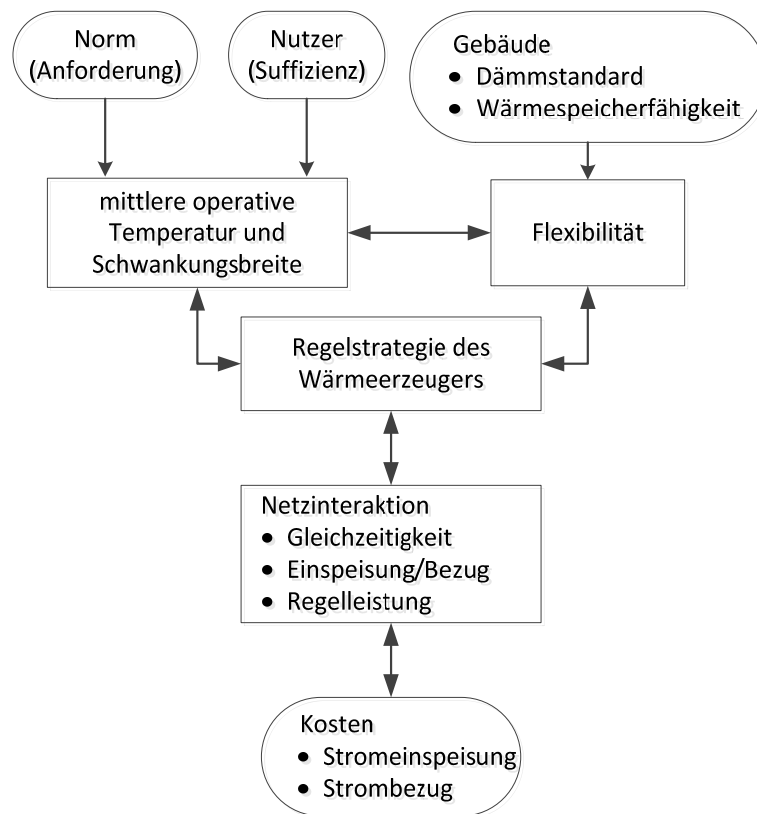


Bild 16: Wechselwirkungen verschiedener Akteure und Parameter bzgl. Regelstrategien des Wärmeerzeugers, der Netzinteraktion und der Kosten für den Energiebedarf.

6.3.3 Ausblick

In Hinblick auf die Energiestrategie 2050 und der damit zunehmenden, naturgemäss stark fluktuierenden Einspeisung von Sonnen- und Windenergie in das Netz spielt das Potential und die Nutzung der energetischen Flexibilität von Gebäuden eine immer grössere Rolle. Wärmepumpen werden zukünftig vermehrt in Blockzeiten mit flexiblen Startzeiten und Laufdauer betrieben, die sich an der Gleichzeitigkeit des Eigenverbrauchs oder an Anforderungen hinsichtlich der Regelleistung im Netz orientieren. Diese Blockzeiten haben zur Folge, dass die operativen Temperaturen in Gebäuden einer grösseren Schwankungsbreite unterworfen sind, als es bei einer kontinuierlichen Beheizung rund um die Uhr der Fall ist, da stärkere Aufheiz- bzw. Abkühlvorgänge stattfinden.

Die Flexibilität mit den Blockzeiten kann jedoch nur genutzt werden, wenn die erhöhte Schwankungsbreite der operativen Temperaturen auch im Normenwerk berücksichtigt wird. Dies bedingt, dass die Anforderungen an die Behaglichkeit für die neuen Gegebenheiten überprüft und angepasst werden müssen. Die aktuellen Anforderungen der SIA 180:2014 an die operativen Temperaturen schränken die energetische nutzbare Flexibilität auf der Grundlage des thermischen Speichers der Gebäudekonstruktion stark ein. Es ist zu diskutieren, wie die SIA 180 im Sinne der Energiestrategie 2050 praxisgerecht weiter entwickelt werden kann. Aus den Ergebnissen dieses Projekts werden folgende Punkte abgeleitet, die im Zusammenhang mit der energetischen Flexibilität neu diskutiert werden müssen:

- Niveau und Breite des zulässigen Temperaturbands der operativen Temperatur
- Zeitlich begrenzte Ausnahmen vom erlaubten Temperaturband
- Abstimmung mit anderen Normen bzgl. Anforderungen an die Behaglichkeit.

7 Referenzen

- [1] F. Dorusch, M. Hall, and R. Dott, "Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Ruppertswil," Schlussbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2014.
- [2] F. Dorusch, M. Hall, and R. Dott, "Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Ruppertswil," 1. Zwischenbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2012.
- [3] F. Dorusch, M. Hall, and R. Dott, "Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Ruppertswil," 2. Zwischenbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2013.
- [4] F. Dorusch, M. Hall, and R. Dott, "Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Ruppertswil," 3. Zwischenbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2013.
- [5] *Persönliche Mitteilung von Herrn Jürg Bichsel, Institutsleiter Institut Energie am Bau FHNW, Muttenz, vormals Firma Sauter, Basel 19.09.2013. .*
- [6] *SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. 2014.*
- [7] *SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. 2007.*
- [8] *Merkblatt SIA 2024 Standardnutzungsbedingungen für Energie – und Gebäudetechnik. 2006.*
- [9] R. Kriesi, "Reales Lüftungsverhalten in Wohnungen," *Stadt Zürich, Amt für Hochbau, www.stadt-zuerich.ch*, 2012.
- [10] *Merkblatt SIA 2023 Lüftung in Wohngebäuden. 2008.*
- [11] "ESRU, ESP-r (open source): A Building and Plant Energy Simulation Environment. Uni-versity of Strathclyde, Glasgow; <http://www.esru.strath.ac.uk>. Programm Version 2012." .
- [12] *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.*
- [13] *SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau. 2009.*
- [14] *SIA Tool Wärmespeicherfähigkeit nach EN ISO 13786. 2006.*
- [15] *ÖNORM B 8110-3 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung. 2012.*

8 Anhang

8.1 Pläne & Konstruktionen

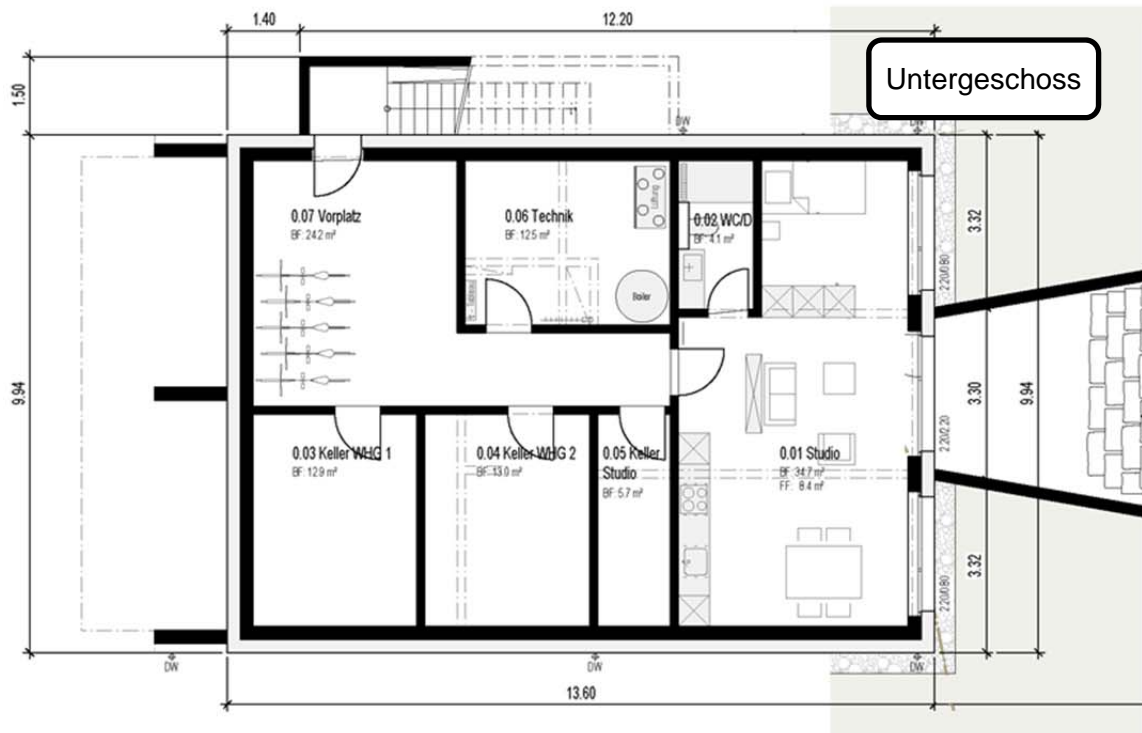


Bild 17: Grundrisse Unter-, Erd- und Obergeschoss (Quelle: Setz Architektur).

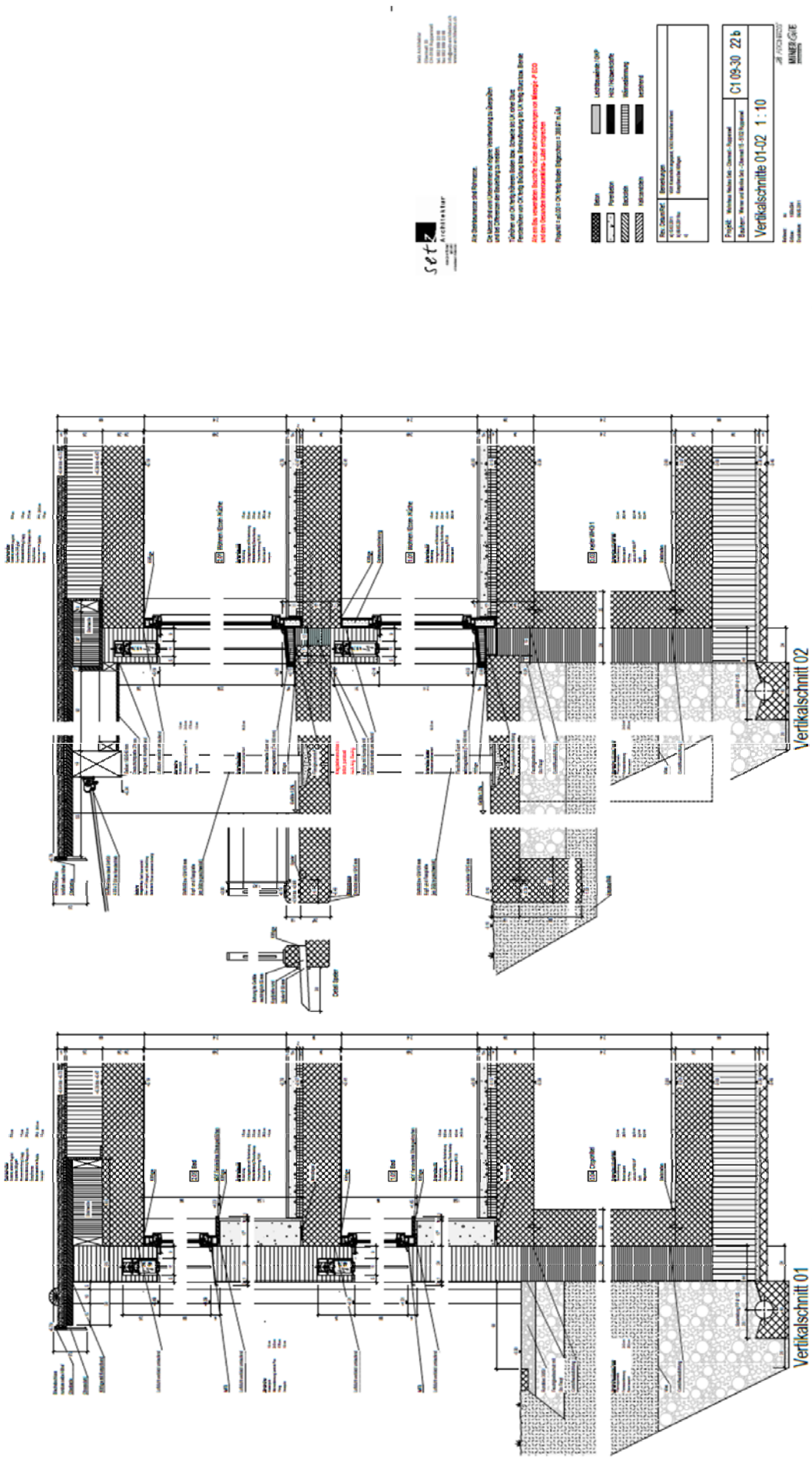


Bild 18: Schnitt (Quelle: Setz Architektur).

Tabelle 10: Konstruktionsdaten. Alle Aufbauten sind in ihrer Schichtfolge von aussen nach innen angegeben (Bauweise real)

Aussenwand					
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]	
Aussenputz	0.800	10	1100	1800	
Dämmung	0.040	240	670	18	
Porenbeton	0.080	175	1000	600	
Innenputz	0.900	10	1100	1600	
U-Wert				0.12	W/(m ² K)

Dach					
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]	
Abdichtung	-	-	-	-	
Dämmung	0.022	240	1400	30	
Beton	2.300	240	1008	2300	
Innenputz	0.900	10	1100	1600	
U-Wert				0.09	W/(m ² K)

Geschossdecke				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Zement	1.400	70	1000	2000
Trittschall	0.033	40	1670	15
Beton	2.300	260	1008	2300
Innenputz	0.900	15	1100	1600

Boden gegen Erdreich (beheizter Teil)					
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]	
Zement	1.400	70	1000	2000	
Trittschall	0.033	20	1670	15	
Dämmung	0.037	40	1400	20	
Beton	2.300	250	1008	2300	
Dämmung	0.038	300	1670	120	
U-Wert				0.10	W/(m ² K)

Boden gegen Erdreich (unbeheizter Teil)					
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]	
Zement	1.400	30	1000	2000	
Beton	2.300	250	1008	2300	
Dämmung	0.038	300	1670	120	
U-Wert				0.12	W/(m ² K)

Wand gegen Erdreich				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Aussenputz	0.800	15	1100	1800
Dämmung	0.033	250	1670	15
Beton	2.300	250	1008	2300
Innenputz	0.900	15	1100	1600
U-Wert			0.13	W/(m ² K)

Innenwand 1				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Putz	0.900	15	1100	1600
Porenbeton	0.090	150	1080	329
Putz	0.900	15	1100	1600

Innenwand 2				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Putz	0.900	15	1600	1600
Gipskarton	0.210	100	1000	900
Putz	0.900	15	1600	1600

Innenwand 3				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Putz	0.800	15	1100	1600
Porenbeton	0.08	200	1080	329
Putz	0.80	15	1100	1600

Haustüre				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Haustüre	0.080	54	780	2000
U-Wert			1.2	W/(m ² K)

Fenster				
	U _w [W/(m ² K)]	U _g [W/(m ² K)]	g-Wert [-]	τ_{vis} [-]
Fenster	0.75	0.50	0.5	0.71

Tabelle 11: Konstruktionsdaten. Alle Aufbauten sind in ihrer Schichtfolge von aussen nach innen angegeben (Bauweise leicht)

Aussenwand				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Holzfaserverplatte	0.045	9	2000	160
Dämmung	0.037	235	1000	300
OSB-Platte	0.130	15	1700	650
Dämmung	0.040	60	670	18
Gipskarton	0.210	12.5	1000	900
U-Wert			0.12	W/(m ² K)

Innenwand (EG, OG)				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Gipskarton	0.09	12.5	1000	1600
Dämmung	0.037	100	1000	300
Gipskarton	0.210	12.5	1000	900

Dach				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Abdichtung	-	-	-	-
Holzfaserverplatte	0.045	80	2000	160
Dämmung	0.022	160	1400	30
Holzfaserverplatte	0.045	80	2000	160
Dämmung/Holz*	0.053	260	1030	200
OSB-Platte	0.13	15	1700	650
U-Wert			0.09	W/(m ² K)

*mit 16% Holzanteil

Geschossdecke				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Zement	1.400	70	1000	2000
Trittschall	0.033	40	1670	15
OSB-Platte	0.13	15	1700	650
Dämmung/Holz*	0.053	200	1030	200
OSB-Platte	0.13	15	1700	650

* mit 16% Holzanteil

Tabelle 12: Konstruktionsdaten. Alle Aufbauten sind in ihrer Schichtfolge von aussen nach innen angegeben (Bauweise massiv)

Aussenwand (EG, OG)					
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]	
Aussenputz	0.800	10	1100	1800	
Dämmung	0.030	243	1000	25	
Beton	2.300	250	1008	2300	
Innenputz	0.900	10	1100	1600	
U-Wert				0.12	W/(m ² K)

Innenwand (Beton 150 mm, UG, EG, OG)				
	λ [W/(m K)]	s [mm]	cp [J/(kg K)]	ρ [m ³ /kg]
Putz	0.900	15	1100	1600
Beton	1.350	200	1000	2000
Putz	0.900	15	1100	1600

8.2 Wärmespeicherfähigkeit Raum "Wohnen"

Tabelle 13: Resultat für die Wärmespeicherfähigkeit des Raums "Wohnen" EG bzgl. des sommerlichen Wärmeschutz mit der Bauweise real (oben), massiv (mitte), leicht (unten) (Berechnet mit [14], Grenzwert auf SIA 180:2014 angepasst).

Die Resultate im Überblick			
Netto-Bodenfläche	A_{NGF}	40.3596	m ²
Raumwert ohne R_{si} (SIA 380/4, SIA 384.201)	C_R/A_{NGF}	122	Wh/(m ² K)
Raumwert mit R_{si} (Norm SIA 382/1)	C_R/A_{NGF}	55	Wh/(m ² K)
Grenzwert (nur für Norm SIA 382/1 relevant)	$(C_R/A_{NGF})_{li}$	45	Wh/(m ² K)
Anforderung an Grenzwert SIA 382/1 erfüllt		ja	ja/nein

Die Resultate im Überblick			
Netto-Bodenfläche	A_{NGF}	40.3596	m ²
Raumwert ohne R_{si} (SIA 380/4, SIA 384.201)	C_R/A_{NGF}	180	Wh/(m ² K)
Raumwert mit R_{si} (Norm SIA 382/1)	C_R/A_{NGF}	68	Wh/(m ² K)
Grenzwert (nur für Norm SIA 382/1 relevant)	$(C_R/A_{NGF})_{li}$	45	Wh/(m ² K)
Anforderung an Grenzwert SIA 382/1 erfüllt		ja	ja/nein

Die Resultate im Überblick			
Netto-Bodenfläche	A_{NGF}	40.3596	m ²
Raumwert ohne R_{si} (SIA 380/4, SIA 384.201)	C_R/A_{NGF}	50	Wh/(m ² K)
Raumwert mit R_{si} (Norm SIA 382/1)	C_R/A_{NGF}	32	Wh/(m ² K)
Grenzwert (nur für Norm SIA 382/1 relevant)	$(C_R/A_{NGF})_{li}$	45	Wh/(m ² K)
Anforderung an Grenzwert SIA 382/1 erfüllt		nein	ja/nein

8.3 Thermische Massen der Einrichtungsgegenstände

Tabelle 14: Thermische Massen der Einrichtungsgegenstände.

Erd- und Obergeschosswohnung			Untergeschosswohnung		
Raum	cp [kWh/K]	Masse [kg]	Raum	cp [kWh/K]	Masse [kg]
Wohnen	0.992	3'003	Wohnen	0.820	2'460
Bad	0.132	542	Bad	0.046	188
WC	0.008	31			
Zimmer 1	0.088	224			
Zimmer 2	0.088	224			
Flur	0.177	448			
Summe	1.486	4'472	Summe	0.866	2'648
Total der Wohnungen	3.84	11'593			

Die Masse der Einrichtungsgegenstände entspricht einer nettoflächenbezogenen Masse von $49 \text{ kg/m}^2_{\text{NGF}}$. In der ÖNORM B 8110-3:2012 [15] ist eine nettoflächenbezogenen Masse für Möbel von $38 \text{ kg/m}^2_{\text{NGF}}$ bei der Berechnung zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung angegeben. Es ist davon auszugehen, dass dieser Wert eher konservativ ist und daher der in diesem Projekt angenommene Wert mehr der Realität entspricht.

8.4 Volumenströme der Wärmeverteilung

Der mittlere Volumenstrom für die Wärmeverteilung der Fussbodenheizung beträgt lt. den technischen Daten $1'900 \text{ l/h}$ (31.6 l/min). Dieser wird basierend auf den Angaben in den Plänen den einzelnen Räumen zugeordnet.

Tabelle 15: Volumenströme für die Wärmeverteilung der Fussbodenheizung.

Erd- und Obergeschosswohnung			Untergeschosswohnung		
Raum	[l/min]	[kg/s]	Raum	[l/min]	[kg/s]
Wohnen	4.6	0.0768	Wohnen	7.6	0.1269
Bad	1.2	0.0200	Bad	0.8	0.0134
Zimmer 1	2.0	0.0334			
Flur	1.8	0.0301			
Zimmer 2	1.4	0.0234			
WC	0.6	0.0100			
Summe	11.6	0.1937	Summe	8.4	0.1403
Total	31.6	0.5277			

8.5 Luftwechsel

Tabelle 16: Berechnung des Luftwechsels über die Fenster und Türen.

Fensterlüftung nach MB 2023				DT = 20K	
Terrassen-/Balkontüre					
VTüre	0.55 m ³ /s		H	2.23 m	
	1992 m ³ /h		B	0.98 m	
Dauer	30 min		0.50 h		
	996 m ³ in 30 min				
pro h/Tag	41.5 m ³ /h			0.75 Wohnen	
				0.25 Flur	
UG Vol	86.64 m ³		nur Living		
EG/OG Vol	96.96 m ³		Living + hall		
Wohnen UG (40 min)			Wohnen EG/OG (30 min)		
nTüre	0.64 1/h		nTüre	0.32 1/h	
nLüftung	0.124 1/h		nLüftung	0.09 1/h	
Summe	0.763 1/h		Summe	0.411 1/h	
Kippfenster für Zimmer 1, Flur, Zimme					
			Öffnungsbr.	0.12 m	
Vkip	0.06 m ³ /s		ck	0.09	
	203 m ³ /h		Alpha	5 ° (Öffnungswinkel)	
Dauer	20 min		0.33 h		
pro Tag	68 m ³ in 20 min				
pro h/Tag	2.8 m ³ /h				
				H	1.4 m
EG/OG	Zimmer 1	Flur	Zimmer 2	B	2.2 m m ²
nfenster	0.07	0.04	0.07 1/h		Bed 1 18
nLüftung	0.09	0.09	0.09 1/h		Flur 27.2
nTüre		0.16	1/h		Bed 2 16.3
Summe	0.155	0.292	0.162 1/h		
Haustüre steht offen					
EG, Flur	20 min		0.33 1/h		
OG, Flur	5 min		0.08 1/h		
UG, Wohnen	5 min		0.08 1/h		
			pro h/Tag		
VHaustüre	664 m ³ in 20 min		27.7 m ³ /h		
	166 m ³ in 5 min		6.9 m ³ /h		
nHaustüre	0.424 1/h		zusätzlich für Flur, EG	0.716 1/h	
	0.106 1/h		zusätzlich für Flur, OG	0.398 1/h	
	0.033 1/h		zusätzlich für Wohnen, UG	0.796 1/h	
EG/OG				UG	
Wohnen	0.411 1/h	Bad/WC	0.009 1/h	Wohnen	0.796 1/h
Zimmer 1	0.155 1/h	Flur EG	0.716 1/h	Bad	0.124 1/h
Zimmer 2	0.162 1/h	Flur OG	0.398 1/h		

8.6 Temperaturen am Temperaturfühler

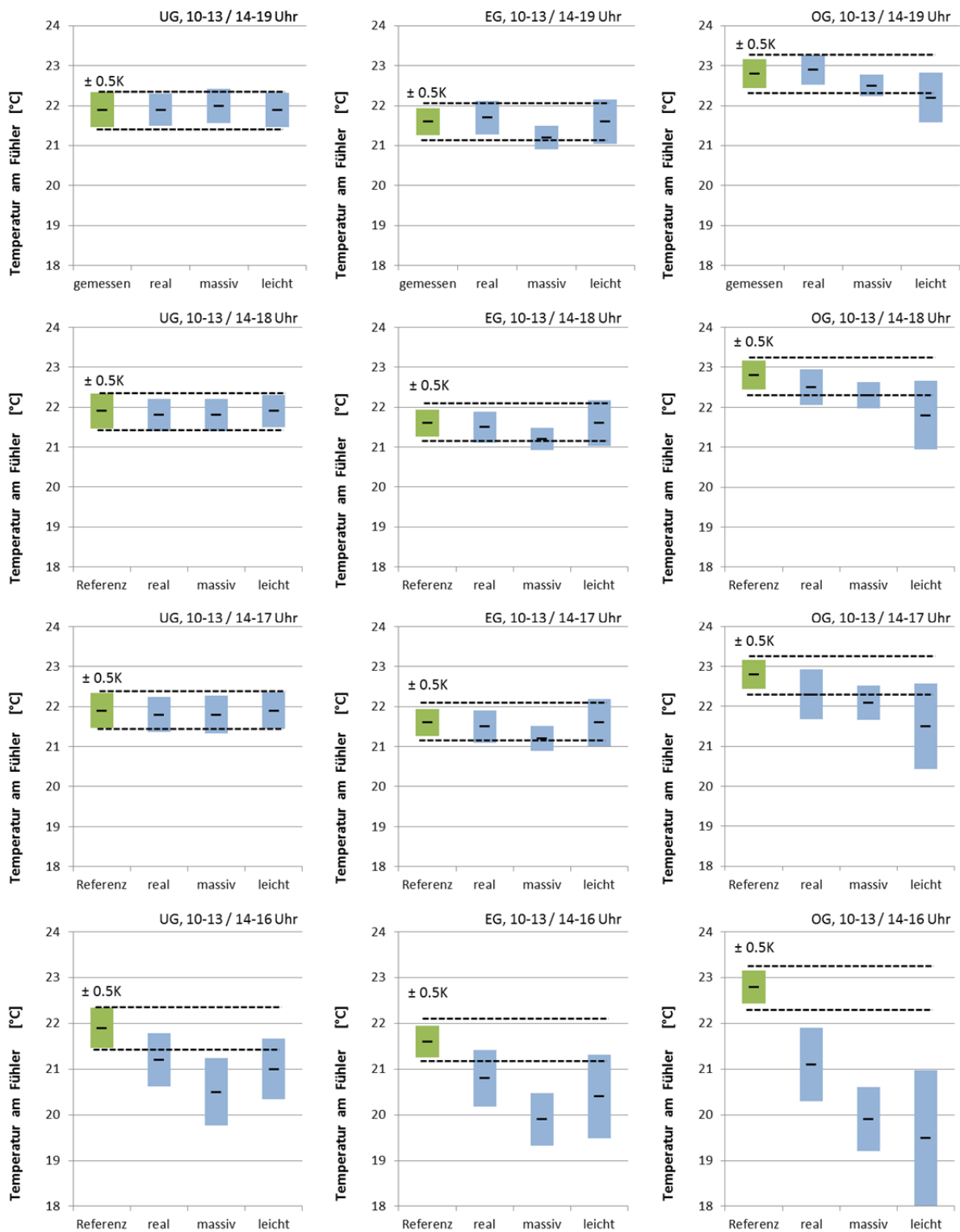


Bild 19: Mittelwerte und Standardabweichung der gemessenen und berechneten Temperaturen am Temperaturfühler "Wohnen" der Unter-, Erd- und Obergeschosswohnung für den Zeitraum 10.2.-11.03.2013 in Abhängigkeit von verschiedenen Bauweisen und Zeitfenstern für die Wärmepumpe zu Heizzwecken (Referenz: gemessene Temperatur).