



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

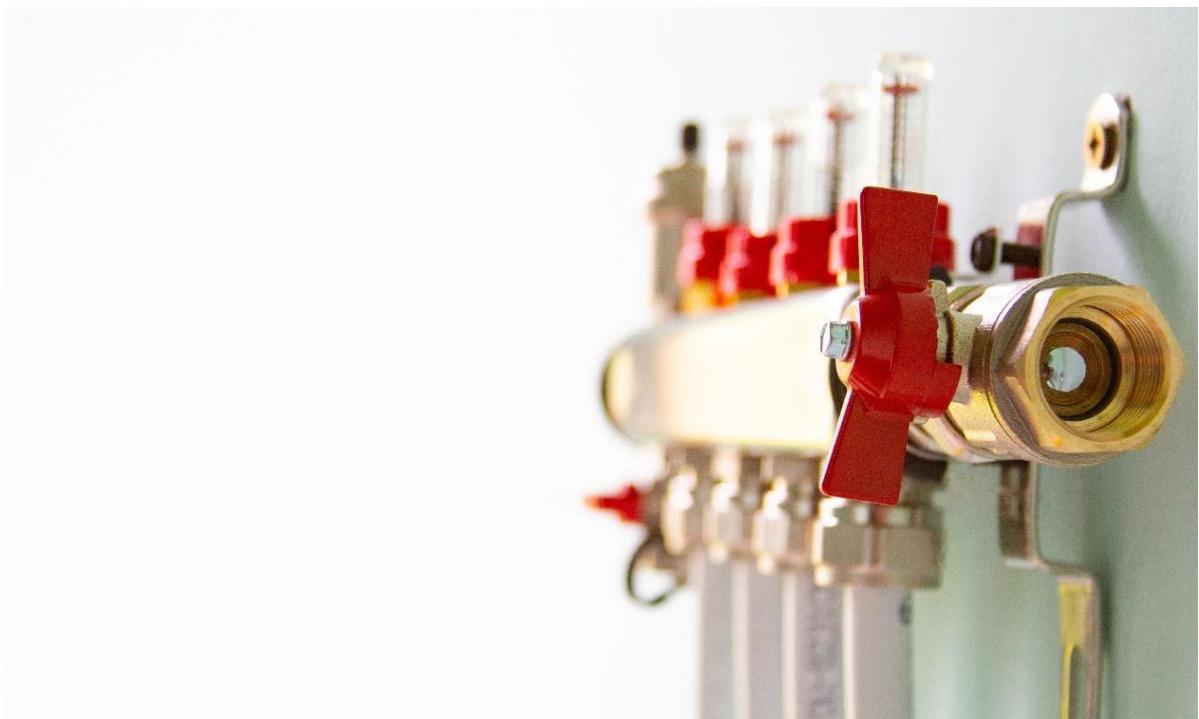
Zwischenbericht vom 18.06.2025

---

## HydAb

Komfort- und Energieeffizienzsteigerung durch  
neue Konzepte zum hydraulischen Abgleich der  
Wärmeverteilung in Wohnbauten

---





INSTITUT FÜR  
SOLARTECHNIK



**Datum:** 18.06.2025

**Ort:** Rapperswil

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Ko-Finanzierung:**

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten  
Energieagentur St.Gallen GmbH  
IMI Hydronic Engineering  
Oventrop (Schweiz) GmbH  
R. Nussbaum AG  
BELIMO Automation AG

**Subventionsempfänger/innen:**

SPF Institut für Solartechnik  
OST – Ostschweizer Fachhochschule  
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil  
[www.spf.ch](http://www.spf.ch)

**Autor/in:**

Robert Haberl, SPF, [Robert.haberl@ost.ch](mailto:Robert.haberl@ost.ch)  
Vera Gütte, SPF, [vera.guetle@ost.ch](mailto:vera.guetle@ost.ch)

**Mit Beiträgen von :**

Amina Guliyeva, ehemals SPF  
Marcel Troxler, ehemals SPF

**BFE-Projektbegleitung:**

Martin Ménard, [menard@lowtechlab.com](mailto:menard@lowtechlab.com)  
Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502518-01

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



## Zusammenfassung

Im Projekt HydAb wird ein Herstellerunabhängiger Vergleich verschiedener Lösungen zur Raumregelung und zum hydraulischen Abgleich, mit einer Quantifizierung der Energie- und Komfortverbesserung für neue Wohnbauten, ermöglicht.

Im ersten Schritt wurden dazu Rahmenbedingungen definiert. Ein virtuelles Mehrfamilienhaus wurde im Simulationsmodell erstellt, inklusive der dynamischen Lastbedingungen. Jede der sechs Wohnungen wird über eine Fußbodenheizung mit 8 Strängen beheizt.

Am Prüfstand wurde die Hardware aufgebaut und die Software erweitert, um zum einen die Wärmelieferung mit Heizkreispumpe und Steigleitung und zum anderen die Wärmeabgabe an eine Wohnung in Echtzeit zu simulieren und zu emulieren. Zwischen Wärmelieferung und Wärmeabgabe können verschiedene Heizkreisverteiler installiert werden, um diese im Hardware-in-the-Loop Verfahren zu testen. Das, dem Test hinterlegte, Simulationsmodell wird dann mit den resultierenden Massenströmen in den einzelnen Strängen der Fußbodenheizung versorgt und liefert die Sollwerte an Austrittstemperatur zur Emulation durch den Prüfstand.

Vortests zur Optimierung der Testinfrastruktur wurden durchgeführt. Dabei wurden diverse Probleme aufgezeigt und behoben. Die Testsequenz zur dynamischen Messung wurde implementiert und mehrere Tests an einem Prüfling durchgeführt, wobei ein Test jeweils über mindestens 7 vollständige Tage unter wechselnden Randbedingungen dauert. Basierend auf den Resultaten wurden die Randbedingungen weiter angepasst.

## Résumé

## Summary

The HydAb project enables a manufacturer-independent comparison of different solutions for room control and hydronic balancing, with a quantification of energy and comfort improvements for new residential buildings.

The first step was to define the framework conditions. A virtual apartment building was created in the simulation model, including the dynamic load conditions. Each of the six apartments is heated via underfloor heating with 8 circuits.

The test bench hardware was set up and the software was expanded to simulate and emulate the heat supply with heating circuit pump and riser duct on the one hand and the heat output to an apartment in real time on the other. Various heating circuit distributors can be installed between heat supply and heat output in order to test them in a hardware-in-the-loop procedure. The simulation model behind the test is then supplied with the resulting mass flows in the individual circuits of the underfloor heating system and provides the setpoint values for the outlet temperature for emulation by the test bench.



Preliminary tests were carried out to optimize the test infrastructure. Various problems were identified and rectified. The test sequence for dynamic measurement was implemented and several tests were carried out on a test specimen, with each test lasting at least 7 complete days under changing boundary conditions. The boundary conditions were further adapted based on the results.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Summary .....</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>7</b>
<b>Nomenklatur.....</b>	<b>8</b>
<b>Begriffserklärung .....</b>	<b>9</b>
<b>1      Einleitung.....</b>	<b>10</b>
1.1   Ausgangslage und Hintergrund .....	10
1.2   Motivation des Projektes .....	10
1.3   Projektziele .....	11
<b>2      Vorgehensweise und Methode .....</b>	<b>11</b>
2.1   Marktübersicht .....	11
2.1.1   Hydraulischer Abgleich .....	11
2.1.2   Statischer hydraulischer Abgleich .....	11
2.1.3   Statischer hydraulischer Abgleich mit statischem Strangregulierventil .....	13
2.1.4   Dynamischer hydraulischer Abgleich mit druckunabhängigem Regelventil.....	14
2.1.5   Dynamische Heizkreisverteiler .....	17
2.1.6   Vollautomatische Systeme .....	18
2.2   Rahmenbedingungen .....	20
2.2.1   Gebäude.....	20
2.2.2   Nutzerprofile .....	21
2.2.3   Heizsystem.....	24
2.3   Simulationsmodell .....	25
2.4   Testaufbau .....	27
2.4.1   Hardware-in-the-Loop .....	27
2.4.2   Steigleitung.....	29
2.4.3   Emulator E.....	30
2.4.4   Temperatursimulationsboxen .....	31
2.4.4.1   Aufbau.....	31
2.4.4.2   Steuerung .....	32
2.4.5   Messstellen .....	34
2.5   Testzyklus und Vergleichskriterien .....	35
2.5.1   Testzyklus .....	35
2.5.2   Bewertung des thermischen Komforts.....	37
<b>3      Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>37</b>



3.1	Simulationsresultate .....	37
3.1.1	Referenzsystem.....	37
3.2	Testergebnisse .....	41
3.3	Potentialanalyse .....	41
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung.....</b>	<b>42</b>
5.1	Projektplan 2025.....	42
5.2	Aktueller Stand .....	43
<b>6</b>	<b>Kommunikation .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>43</b>
	<b>Annex A : Gebäudedaten .....</b>	<b>44</b>
	<b>Annex B : Auslegung Fussbodenheizung .....</b>	<b>45</b>
	<b>Annex C: Hydraulikschema Versuchsaufbau .....</b>	<b>48</b>
	<b>Annex D: Detaillierte Simulationsresultate des Referenzsystems .....</b>	<b>49</b>



## Abkürzungsverzeichnis

FBH	Fussbodenheizung
LPG	LoadProfileGenerator
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKEEn	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
NGF	NettoGESCHossfläche
PIC	pressure independent control (valve), druckunabhängiges Regelventil
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
TAS	Regelventil TA-Smart von Imi Hydronics
TES	Thermal Energy Storage
TEZ	Messgerät Thermischer Energie Zähler von Belimo
WP	Wärmepumpe
WÜ	Wärmeübertrager
WW	Warmwasser



## Nomenklatur

### Variable

$P_{hzg}$		Heizkreispumpe
$T_{raum,j}$	°C	Emulierte Raumtemperatur
$T_{hzg,vl}$	°C	Vorlauftemperatur Heizung
$T_{str,i,rl}$	°C	Rücklauftemperatur, Strang i
$T_{str,i,vl}$	°C	Vorlauftemperatur, Strang i
$V_{whg}$	%	Ventilstellung des Regelventils in %
$V_{str,i}$	%	Regelventil in den einzelnen Heizsträngen
$\dot{V}_{hzg}$	l/h	Volumenstrom Heizung gesamt, gemessen in Emulator A
$\dot{V}_{whg,x}$	l/h	Volumenstrom Wohnung x, gemessen in Steigleitung
$\dot{V}_{str,i,B}$	l/h	Volumenstrom Strang i, gemessen mit TEZ (Belimo)
$\dot{V}_{str,i,I}$	l/h	Volumenstrom Strang i, gemessen mit TA-Smart (Imi)
$\Delta p_{str,i}$	kPa	Druckdifferenz, Strang i

### Indizes

$i$	Strang der Fußbodenheizung, insgesamt 8 Stränge
$j$	Raumtemperatur, insgesamt 5 Raumthermostate
$x$	Wohnung x des Gebäudes (bspw. 1.OG West)



## Begriffserklärung

(für Begriffe mit Kapitelübergreifender Relevanz)

**Emulation:** Nachbildung eines realen Systems oder seiner Komponenten durch ein anderes System. Dies ermöglicht es, das Verhalten und die Interaktionen des zu testenden Systems unter kontrollierten Bedingungen zu analysieren.

**Hardware-in-the-Loop-Verfahren:** Reale Hardware, wie z.B. ein Heizkreisverteiler, wird mit einer simulierten Umgebung verbunden, die das physische System nachbildet. Die Simulation erfolgt in Echtzeit um ein realitätsnahe Szenario sicherzustellen.

**Hydraulischer Abgleich:** Ein hydraulischer Abgleich ist erforderlich, um zu erreichen, dass sich in einem verzweigten hydraulischen System definierte Volumenströme einstellen



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

In verschiedenen Projekten wurde festgestellt, dass der thermische Komfort in Neubauten von den Bewohnern als nicht zufriedenstellend bewertet wird. Dies wird häufig über eine höhere Raumtemperatur kompensiert, wie dies in der BFE Studie VenTSol aufgezeigt wurde (Durschnitt liegt bei 23°C). In derselben Studie wurde mittels einer umfangreichen Befragung oft auch der kalte Fussboden als ein Problem genannt. Ein Grund für ungenügenden Komfort könnte der mangelhafte hydraulische Abgleich im Heizverteilssystem sein, der in vielen Fällen wegen des hohen Aufwands nicht nachträglich durchgeführt wird. Um dem Problem des Unbehagens entgegenzuwirken, wird in der Praxis häufig die Vorlauftemperatur erhöht, was wiederum zu einem höheren Strombedarf bei der Wärmepumpe führt. Eine andere Gegenmassnahme die häufig ergriffen wird, ist die Erhöhung des Volumenstroms im Heizkreis, was wiederum zu einer Erhöhung des Strombedarfs der Pumpen führt und – was noch schwerwiegender ist - einen negativen Einfluss auf die Speicherschichtung und somit auf die Effizienz des Gesamtsystems haben kann. Mit diesen Massnahmen - der Erhöhung des Volumenstroms und der Vorlauftemperatur - erreicht man einerseits eine Verbesserung in den problematischen Wohnungen, andererseits führt diese Anpassung dazu, dass andere Wohnungen übertemperierte werden (Zonen ohne Raumregelung z.B. Bad) und im schlimmsten Fall die Bewohner über die Fensterlüftung zu angenehmen Raumtemperaturen kommen.

Das Problem des mangelhaften hydraulischen Abgleichs im Schweizer Gebäudepark ist in der Branche schon lange bekannt. Grundsätzlich stehen hierfür Informationen von «GebäudeKlima Schweiz» und von «suisse tec» zur Verfügung. In Gesprächen mit Planenden wird jedoch deutlich, dass konkrete Empfehlungen bei der Umsetzung den Planenden nicht zur Verfügung stehen (nur allgemeine Empfehlungen). Zudem gibt es eine grosse und unübersichtliche Produktauswahl im Bereich der Strangregulierventile und anderer Komponenten sowie ihrer Funktionen. Weiter kann festgehalten werden, dass ein manueller hydraulischer Abgleich sehr aufwändig ist, da sich bei Einstellung eines Kreises auch der Volumenstrom in einem anderen Kreis verändern kann. Oft wird bei der Ausschreibung der hydraulische Abgleich nicht berücksichtigt, weswegen er in der Regel auch nicht durchgeführt wird.

## 1.2 Motivation des Projektes

Feldtests können aus verschiedenen Gründen den Vergleich mit identischen Rahmenbedingungen nicht gewährleisten: zu gross sind hier die Unterschiede im einzelnen Objekt sowohl in der verbauten Hardware als auch im Nutzerprofil, zudem muss der Komfort für die Nutzer der Gebäude zu jeder Zeit gewährleistet werden. Abhilfe schafft hier das Konzept der Hardware-in-the-Loop. Mit diesem Konzept werden identische Test-Bedingungen geschaffen, indem bestimmte Komponenten eines Gesamtsystems mittels dynamischen Real-Time Simulationen berechnet und im Prüfstand abgebildet, also emuliert, werden.



### 1.3 Projektziele

Ziel des Projektes ist ein herstellerunabhängiger Vergleich verschiedener Lösungen zur Regelung der Raumtemperatur und zum hydraulischen Abgleich, mit einer Quantifizierung der Komfortverbesserung und Reduktion des Heizwärmeverbrauchs für neue Wohnbauten durch die Anwendung unterschiedlicher Produkte gegenüber heutigen Standardlösungen.

Auch das Energieeinsparpotenzial und der Nutzen im Sanierungsfall mit Heizungersatz (Wärmepumpe) sollte durch den Einsatz von validierten Simulationsmodellen untersucht werden.

Zusätzlich soll das Potenzial einer Kommunikation zwischen Raumregelung und Heizungssystem für eine aktive Optimierung von Vorlauftemperatur und Heizgrenze sowie der Möglichkeit einer vorausschauenden Regelung der Heizgrenze und Vorlauftemperatur untersucht werden.

Die Resultate der Messungen sollten in Factsheets präsentiert werden. Die Informationsaufbereitung sollte auf die Bedürfnisse der Fachkräfte abgestimmte sein, mit der Möglichkeit die Factsheets auch in Aus- und Weiterbildung zu verwenden.

## 2 Vorgehensweise und Methode

### 2.1 Marktübersicht

#### 2.1.1 Hydraulischer Abgleich

Ein hydraulischer Abgleich ist erforderlich, um zu erreichen, dass sich in einem verzweigten hydraulischen System definierte Volumenströme einstellen. Die nötigen Volumenströme müssen dazu vorab rechnerisch ermittelt werden. Im Fall des hydraulischen Abgleiches von Heizsystemen mit Fußbodenheizung (FBH) ist die Vorgehensweise vereinfacht beschrieben:

1. Bestimmung des spezifischen Wärmebedarfes des gesamten Gebäudes sowie des Wärmebedarfes der einzelnen Räume.
2. Leistung der FBH berechnen und Aufteilung in einzelne Stränge.
3. Berechnung der Volumenströme und Druckverluste in den einzelnen Strängen.
4. Einstellung der Ventile am Heizkreisverteiler.
5. Fördermenge Heizungspumpe zur Überwindung des Druckverlustes einstellen.

#### 2.1.2 Statischer hydraulischer Abgleich

In Abbildung 1 ist ein vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung mit je einem Heizkreisverteiler pro Wohnung im MFH mit sechs Wohnungen, auf 3 Stockwerken zu sehen. Die zentrale Heizkreispumpe liefert den Volumenstrom für das gesamte Gebäude. Per Steigleitung werden die einzelnen Wohnungen versorgt, je Wohnung werden über die Heizkreisverteilung jeweils 8 Stränge der FBH mit Wärme versorgt.

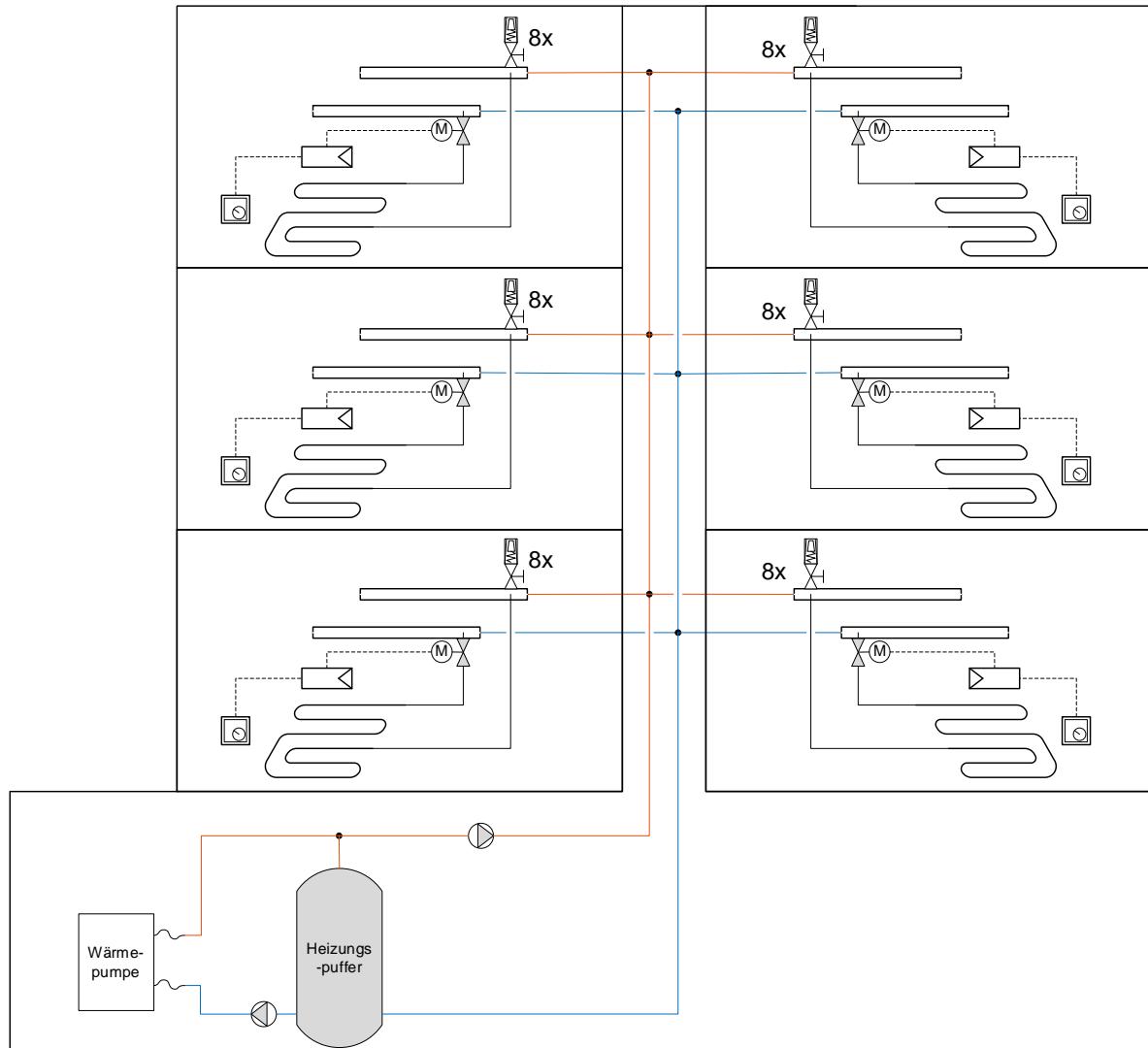


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung mit je einem Heizkreisverteiler pro Wohnung im MFH mit sechs Wohnungen, auf 3 Stockwerken. Je Wohnung werden über die Heizkreisverteilung jeweils 8 Stränge der FBH mit Wärme versorgt. Vereinfacht ist pro Verteiler nur ein Heizkreis eingezeichnet. Gezeigt werden Heizkreisverteiler für den statischen hydraulischen Abgleich.

Die Funktion vom Heizkreisverteiler der Fußbodenheizung besteht darin, für eine gleichmäßige Wärmeverteilung in allen Strängen der FBH zu sorgen. Die Heizkreise werden jeweils mit ihrem Vorlauf und Rücklauf an die Heizkreisverteiler angeschlossen. An dem Heizkreisverteiler kann jeder einzelne Heizkreis mit Hilfe eines Ventils hydraulisch abgeglichen werden, d.h. der Durchfluss des Heizungswassers kann eingestellt werden. Deshalb sind in den Heizkreisverteilern in der Regel Durchflussmengenmesser integriert, die die Funktion haben, den Volumenstrom (in Liter pro Minute) optisch sichtbar zu machen. Die Ventile zur Einstellung des Durchflusses im einzelnen Strang sind im einfachsten Fall – beim statischen hydraulischen Abgleich – druckabhängig. Das Öffnen oder Schliessen eines Ventils verändert die Verhältnisse im gesamten System. Es muss also ein optimales Gleichgewicht über sämtliche Stränge gefunden werden.



Eine zusätzliche Komponente des Systems sind ein Raumthermostat je Raum in Kombination mit einem Ventil und Stellmotor pro Heizungsstrang. Bei mehreren Strängen der FBH pro Raum werden die Stellmotoren der Stränge synchron angesteuert. Jede Abweichung vom Sollwert der Raumtemperatur veranlasst den Stellantrieb, eine entsprechende Hubbewegung an das Ventil weiterzugeben. Auch diese Drosselung des Volumenstromes hat eine Änderung der Druckverhältnisse im System zur Folge. Entsprechend ist der statische hydraulische Abgleich, bei dessen Ausführung sämtliche Stellmotoren vollständig geöffnet sind, nur unter Vollast sicher gewährleistet.

### 2.1.3 Statischer hydraulischer Abgleich mit statischem Strangregulierventil

In Abbildung 2 ist ein vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per Heizkreisverteiler mit statischem hydraulischem Abgleich und zusätzlichem Abgleichventil vor dem Verteilerbalken zu sehen.

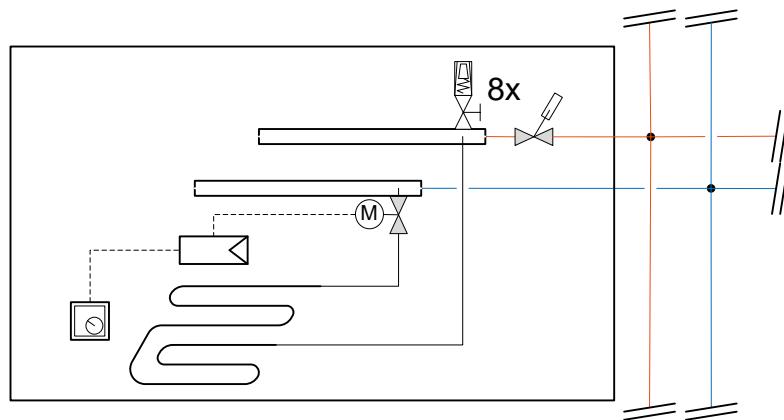


Abbildung 2: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per Heizkreisverteiler mit statischem hydraulischem Abgleich und statischem Strangregulierungsventil.

In Zweirohrheizsystemen ändern sich permanent die hydraulischen Bedingungen, da die Ventile je nach Heizbedarf öffnen und schließen. Dies führt kontinuierlich zu Änderungen in Durchfluss und Differenzdruck. Das zusätzliche Abgleichventil (Strangregulierventil oder Tacosetter) wird zum genauen Einregulieren des Volumenstroms im gesamten Gebäude verwendet bzw. um im gesamten Rohrnetz Druckverluste gemäss der Auslegung herzustellen.

Als Strangregulierventile werden nachfolgend Schrägsitzventile, mit Handrad zum Einstellen des Druckverlusts, bezeichnet. Für das Einregulieren von hydraulischen Systemen mit Strangregulierventilen muss der vom Ventil zu erzeugende Druckverlust bei einem bestimmten Volumenstrom bekannt sein. Je nach Hersteller wird der resultierende Kv-Wert direkt am Handrad eingestellt oder die benötigte Ventilposition wird in Abhängigkeit des Druckverlusts bei einem bestimmten Volumenstrom aus bereitgestellten Diagrammen entnommen.

Tabelle 1: Herstellerübersicht verschiedener Abgleichventile.

Hersteller	Bezeichnung	Beschreibung
------------	-------------	--------------



Caleffi	Serie 130	Strangregulierventil mit integrierter Messblende und Messstutzen zur Volumenstrommessung (Venturi Prinzip).
Danfoss	LENO MSV	Ausgleichventil mit integriertem Kugelhahn zur Strangabsperrung. Als Ausführung mit Messblende (Venturi Prinzip) und Entleerung verfügbar
IMI	STAD	Strangregulierventil mit Messstutzen und Absperrfunktion
IMI	TBV	Strangregulierventil / Handrad / Messnippel
IMI	TBV-CM	Strangregulierventil / Handrad / Messnippel
KSB	BOA-Control SBV	Strangregulierventil / Handrad / Differenzdruckmessung
Oventrop	HydroCom V	Strangregulierventil / Handrad / Differenzdruckmessung
Oventrop	HydroControl MTR	Strangregulierventil / Handrad / Differenzdruckmessung
Watts Industries	Idroset-CF	Abgleichventil / optische Anzeige
Taconova	TacoSetter mit Bypass	Abgleichventil / optische Anzeige
Taconova	TacoSetter Inline	Abgleichventil / optische Anzeige

#### 2.1.4 Dynamischer hydraulischer Abgleich mit druckunabhängigem Regelventil

Über das oben beschriebene manuelle Abgleichventil wird im Volllastfall ein bestimmter Differenzdruck abgebaut. Im Teillastfall sinkt der Druckverlust im Rohrnetz mit dem reduzierten Massenstrom. Entsprechend fällt der Druckverlust über dem manuellen Thermostatventil stark ab. Der gesamte überschüssige Druck muss nun vom Thermostatventil abgebaut werden mit der Folge, dass das Thermostatventil sehr oft am Schliesspunkt arbeitet und das Regelverhalten dadurch beeinträchtigt wird.

Um dem entgegenzuwirken können druckunabhängige Ventile eingesetzt werden.

In Abbildung 3 ist ein vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung mit Strangdifferenzdruckregler vor dem Heizkreisverteiler mit dynamischem hydraulischem Abgleich zu sehen.

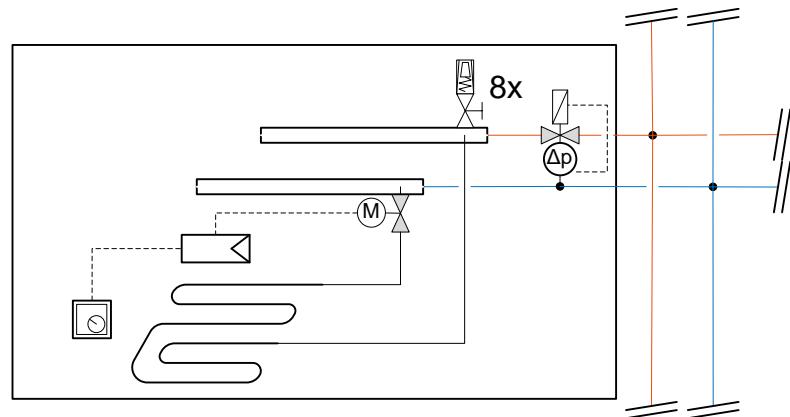


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per Heizkreisverteiler mit dynamischem hydraulischen Abgleich mittels Strangdifferenzdruckregler.

Eine weitere Möglichkeit besteht in druckunabhängigen Regelventilen, wie in Abbildung 4 dargestellt.

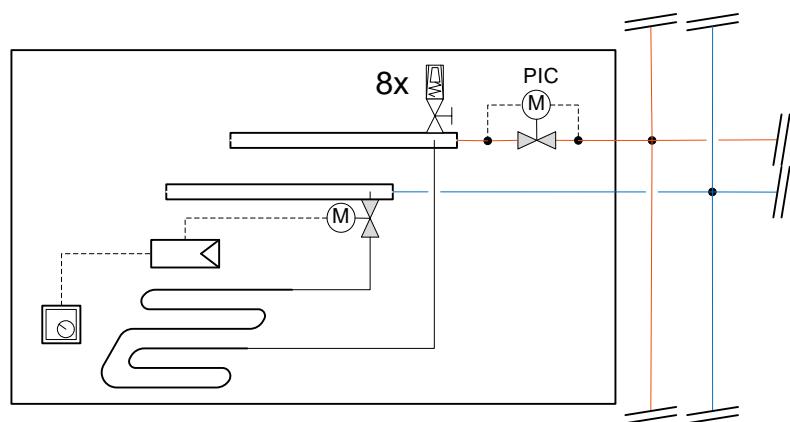


Abbildung 4: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per Heizkreisverteiler mit dynamischem hydraulischen Abgleich und druckunabhängigem Regelventil (PIC Ventil).

Ein elektronisches druckunabhängiges Regelventil (vgl. Abbildung 5) besteht aus den Komponenten Regelkugelhahn, Ventilantrieb und Volumenstromsensor. Da der aktuelle Durchfluss permanent gemessen wird, passt das Ventil in Abhängigkeit von der Last die benötigte Wassermenge an, und der Druckverlust des Ventils (Differenzdruck) ist dann das Ergebnis des Volumenstroms und nicht über eine Ventilgröße oder den kvs-Wert definiert. Eine Differenz zwischen eingestelltem Sollwert und dem aktuellen Durchfluss durch eine Änderung des Differenzdrucks wird somit über den Öffnungswinkel des Regelkugelhahns ausgeglichen.

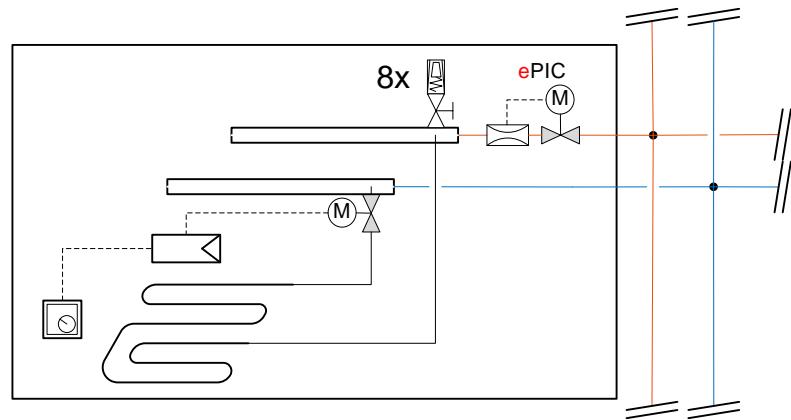


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per Heizkreisverteiler mit dynamischem hydraulischen Abgleich und elektronischem druckunabhängigem Regelventil (ePIC).

"Unabhängig vom Differenzdruck" bedeutet somit, dass dem Verbraucher immer die korrekte Wassermenge zur Verfügung gestellt wird und dass die Regelgüte nicht von der Position des Ventils im hydraulischen System und den vorherrschenden Druckverhältnissen abhängig ist.



Tabelle 2: Herstellerübersicht druckunabhängiger Regelventile.

Hersteller	Bezeichnung	Beschreibung
Belimo	EPIV	Regelkugelhahn / Stellmotor
Belimo	EV	Regelventil / Stellmotor / Energiezähler
Caleffi	Serie 145 mit FLOWMATIC	Regelventil / Stellmotor / Nur geeignet ohne Einzelraumregelung
Danfoss	AB-PM	Regelventil / Zonenregelung / Differenzdruckregelung
Danfoss	AB-QM	Regelventil / Zonenregelung / Durchflussmessung / Nur geeignet ohne Einzelraumregelung
IMI	TA-COMPACT Sets	Regelventil / Zonenregelung / Installations-Set
IMI	TA-COMPACT-P	Regelventil / Zonenregelung / Durchflussmessung
Nur geeignet ohne Einzelraumregelung		
IMI	TA-COMPACT-DP	Regelventil / Zonenregelung / Differenzdruckregelung
KSB	BOA-Control DPR	Regelventil / Messnippel / Druckverlustmessung
KSB	BOA-Control PIC	Regelventil / Messnippel / Stellmotor / Druckverlustmessung / Nur geeignet ohne Einzelraumregelung
Oventrop	Cocon QDP	Regelventil / Zonenregelung / Stellmotor / Differenzdruckregelung
Oventrop	Cocon QTZ	Regelventil / Zonenregelung / Durchflussmessung / Nur geeignet ohne Einzelraumregelung

### 2.1.5 Dynamische Heizkreisverteiler

Als Weiterentwicklung zum dynamischen hydraulischen Abgleich, wird beim dynamischen Heizkreisverteiler auch der Teillastfall durch den Verteiler selbst berücksichtigt. Die Komponenten, die beim dynamischen System zum Einsatz kommen, sind Strangdifferenzdruckregler oder druckunabhängigen Thermostatventile, dessen Aufgabe es ist, den Druck der Wasserströme in der Anlage unabhängig von der Auslastung des Systems gebäudeweit



konstant zu halten. Im Gegensatz zum System mit dynamischen hydraulischen Abgleich und vorgelagerten druckunabhängigen Ventil sind hier die Regelventile in jedem einzelnen Strang druckunabhängig.

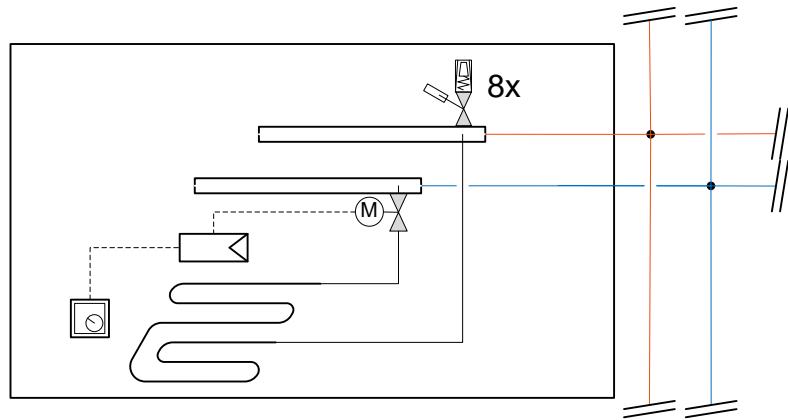


Abbildung 6: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung per dynamischen Heizkreisverteiler.

Tabelle 3: Herstellerübersicht dynamische Heizkreisverteiler.

Hersteller	Bezeichnung	Beschreibung
Cosmo	Balance	Verteiler / Durchflussregler / Durchflussmengenanzeiger
IMI	Dynacon Eclipse AFC	Verteiler / Durchflussregler / Durchflussmengenanzeiger
Meier Tobler	AFC-Verteiler	Verteiler / Durchflussregler / Durchflussmengenanzeiger
Oventrop	Multidis SFQ	Verteiler / Durchflussregler / Durchflussmengenanzeiger
Watts Industries	HKV2013A-50-1"-AFC	Verteiler / Durchflussregler / Durchflussmengenanzeiger

### 2.1.6 Vollautomatische Systeme

Beim automatischen hydraulischen Abgleich wird die Berechnung und Einstellung der Heizungswasserströme von einer intelligenten digitalen Systemsteuerung durchgeführt. Die Automatik führt keine einmalige Berechnung der Wasserströme durch, sondern berechnet diese permanent, sodass die Einstellung regelmäßig nachjustiert wird.

Zentrale Regelungsgröße des automatischen hydraulischen Abgleichs ist die Raumtemperatur. Das Steuerungssystem erfasst entweder, bei welchen Wasserströmen (vgl. Abbildung 7), oder bei welcher Rücklauftemperatur (vgl. Abbildung 8) die vorgesehene Raumtemperatur erreicht wird.

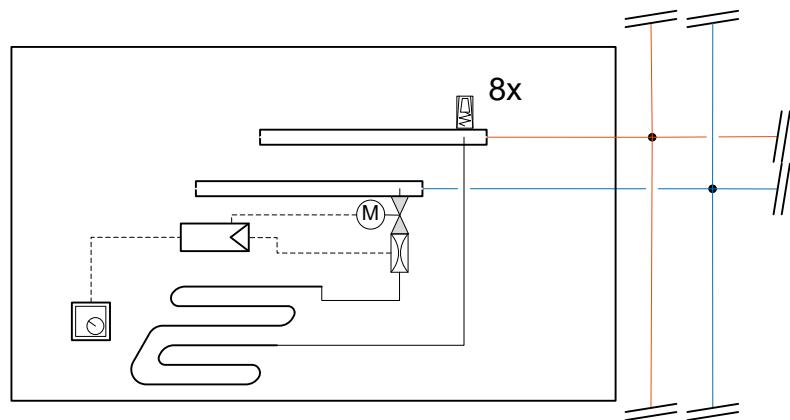


Abbildung 7: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung mit vollautomatischem Heizkreisverteiler über die Erfassung der Wasserströme.

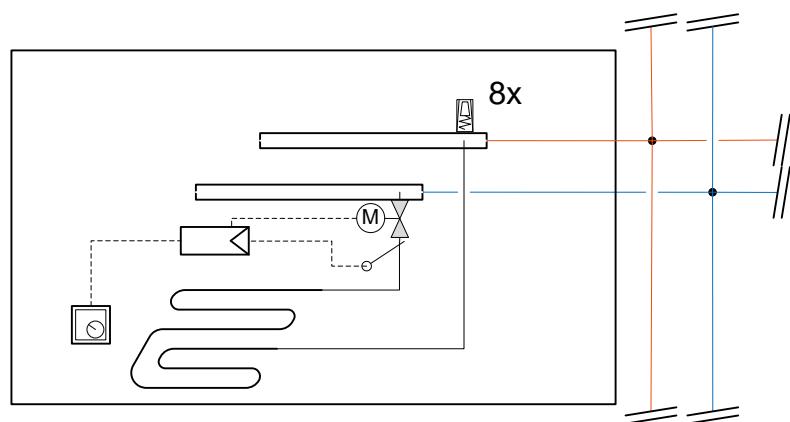


Abbildung 8: Vereinfachtes Schema zur Raumwärmeverteilung in einer Wohnung mit vollautomatischem Heizkreisverteiler über die Erfassung der Rücklauftemperatur.

Tabelle 4: Herstellerübersicht vollautomatische Systeme.

Hersteller	Bezeichnung	Beschreibung
Belimo	EM-ECQ	Verteilersystem / Stellmotor
Nussbaum	Therm-Control	Verteilersystem / Stellmotor
Uponor	Vario PLUS	Verteilersystem / Stellmotor
Oventrop	FloorCon F300	
Meier Tobler	Smart Comfort	Komponenten von Watts Industries
Danfoss	Icon	



## 2.2 Rahmenbedingungen

Für den Vergleich verschiedener Lösungen zum hydraulischen Abgleich wurden genaue Definitionen von Randbedingungen und ein Prüfkonzept erarbeitet. Für die Simulation des Gebäudes steht das Modell des SPF Referenzgebäudes zur Verfügung, welches bereits individuelle Wohneinheiten inklusive realen Lastbedingungen und die Wärmeübertragung auf das Gebäude beinhaltet. Dieses Gebäude wurde im Detaillierungsgrad an die geforderten Bedingungen im vorliegenden Projekt angepasst. Die Simulationsmodelle können zu einem späteren Zeitpunkt auch dazu verwendet werden, um Extrapolationen auf andere Gebäude oder Einsatzgebiete zu tätigen.

### 2.2.1 Gebäude

Das vom SPF entwickelte Referenz-Mehrfamilienhaus (MFH25, [1]) (Abbildung 9) repräsentiert einen aktuellen Neubau (2021), der die Anforderungen der Schweizer MuKEs (Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich [2]) erfüllt.

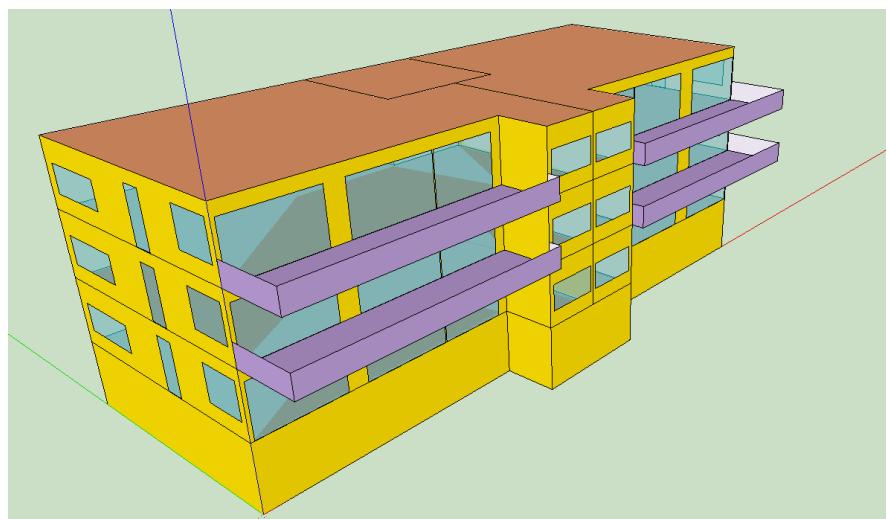


Abbildung 9: Simuliertes Mehrfamilienhaus.

Das Gebäude besteht aus sechs Wohneinheiten. Andere Gebäude oder Objekte wie Bäume beschatten das Gebäude nicht. Außerdem gibt es im Gebäude keine aktive Lüftung. Tabelle 5 zeigt die allgemeinen Spezifikationen des Gebäudes, Tabelle 6 zeigt die beheizte Wohnfläche.

Tabelle 5: Allgemeine Merkmale des Gebäudes.

Energiebezugsfläche (EBF)	1200 m <sup>2</sup>
Nettogeschossfläche	1027 m <sup>2</sup>



---

Verhältnis Fenster zu EBF (%)	22 %
Gebäudehüllzahl	1.4

---

Tabelle 6: Beheizte Wohnfläche der einzelnen Wohnungen.

	West	Ost
2. OG	2OG_West 143.3 m <sup>2</sup>	2OG_Ost 150.9 m <sup>2</sup>
1.OG	1OG_West 143.3 m <sup>2</sup>	1OG_Ost 150.9 m <sup>2</sup>
EG	EG_West 143.3 m <sup>2</sup>	EG_Ost 150.9 m <sup>2</sup>
Total		882.6

Weitere Details zum Gebäude (Wandaufbauten, Fensterflächen etc.) sind in Annex A aufgeführt.

### 2.2.2 Nutzerprofile

Mit Hilfe des Programms LoadProfileGenerator (LPG) [3] wurden Profile für sechs Haushalte angelegt. Diese Profile enthalten Anwesenheitsprofile der jeweiligen Personen und Verbrauchsprofile sowohl für die elektrischen Haushaltsgeräte als auch für den Warmwasserbedarf. In Tabelle 7 ist eine Beschreibung der einzelnen Profile zu sehen, in Tabelle 8 deren Zuordnung zu den einzelnen Wohnungen.



Tabelle 7: Beschreibung der Haushaltstypen.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl Personen [-]	Haushaltsstrom
			[MWh]
CHR33	Ehepaar, beide unter 30 Jahre.	2	2.88
CHR44	Familie mit zwei Kindern, ein Elternteil berufstätig.	4	3.52
CHR27	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile berufstätig.	4	2.96
CHS04	Ehepaar, beide im Ruhestand.	2	1.97
CHR55	Ehepaar, beide berufstätig.	2	2.4
CHR18	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile zu Hause.	4	3.03
Total		18	16.16

Tabelle 8: Zuordnung der Haushaltstypen zu den einzelnen Wohnungen im Gebäude.

	West	Ost
2. OG	CHR55	CHR18
1.OG	CHR27	CHS04
EG	CHR33	CHR44

Sowohl aus den Anwesenheitsprofilen der Personen als auch aus den elektrischen Profilen wurden interne Lasten für die Simulation der Gebäudelasten abgeleitet. Zur Bestimmung der Wärmelasten durch Personen dienen die Vorgaben aus der ISO 7730:2005 [4] (im Durchschnitt 80 W sensible Wärmeabgabe pro Person). Der elektrische Verbrauch des Haushaltsstromes wurde zu 70 % als Wärme gerechnet. In Tabelle 9 sind die resultierenden jährlichen Wärmegewinne aufgrund von Belegung, Geräten und Beleuchtung der Wohnungen dargestellt.



Tabelle 9: Jährliche interne Wärmegewinne aufgrund von Belegung, Geräten und Beleuchtung innerhalb der Wohnungen in MWh.

	2OG_West	2OG_Ost
Anwesenheit	0.75	2.13
Licht und Geräte	1.68	2.12
Total	2.42	4.27
	1OG_West	1OG_Ost
Anwesenheit	1.83	1.00
Licht und Geräte	2.07	1.38
Total	3.90	2.38
	EG_West	EG_Ost
Anwesenheit	0.85	1.97
Licht und Geräte	1.59	2.47
Total	2.44	4.43
	Total	
Anwesenheit	8.51	
Licht und Geräte	11.31	
Total	19.83	

Das Gebäude hat keine mechanische Lüftung. Aufgrund von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle wird ein natürlicher Luftwechsel von  $0,7 \text{ m}^3/(\text{hm}^2_{\text{NGF}})$  (SIA 380/1) angenommen.

Alle Fenster in den Gebäuden sind mit Aussenstoren ausgestattet. Gemäss der SIA380/1 [5] werden die Aussenstoren in der Winterperiode ( $T_{\text{amb},24h}^1 < T_{\text{HL}}^2$ ) aktiviert, wenn alle folgenden Bedingungen erfüllt, sind:

- Sonneneinstrahlung auf die entsprechende Fassade höher als  $200 \text{ W/m}^2$  (Deadband  $-50 \text{ W/m}^2$ );
- Windgeschwindigkeit niedriger als  $10 \text{ m/s}$  (Deadband  $\pm 1 \text{ m/s}$ );
- Operative Raumtemperatur höher als  $23^\circ\text{C}$  (Deadband  $\pm 1^\circ\text{C}$ );
- Die Durchschnittstemperatur der letzten 24 Stunden liegt unter der Heizgrenze von  $18^\circ\text{C}$  ( $\pm 0,5 \text{ K}$ ).

<sup>1</sup> Durchschnittliche Tagestemperatur

<sup>2</sup> Heizgrenze



Wenn die Storen aktiviert sind, wird der g-Wert des Fensters um einen Multiplikationsfaktor (siehe Tabelle 10) reduziert, um einen g-Wert des beschatteten Fensters von 0,15 zu erhalten. Der U-Wert des Fensters ändert sich nicht, wenn die Aussenstoren aktiviert ist.

Im Sommer ( $T_{amb,24h} > T_{HL}$ ) wird die Beschattung aktiviert, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Sonneneinstrahlung auf die entsprechende Fassade höher als  $200 \text{ W/m}^2$  (Deadband  $-50 \text{ W/m}^2$ );
- Windgeschwindigkeit kleiner als  $10 \text{ m/s}$  (Deadband  $\pm 1 \text{ m/s}$ );
- Operative Raumtemperatur höher als  $21^\circ\text{C}$  (Deadband  $\pm 1^\circ\text{C}$ );
- Die Durchschnittstemperatur der letzten 24 Stunden liegt über der Heizgrenze von  $18^\circ\text{C}$  ( $\pm 0,5 \text{ K}$ ).

Tabelle 10: g-Wert der Fenster nach Anwendung des Multiplikationsfaktors.

g (Fenster)	Multiplikationsfaktor	g (Fenster+Storen)
0.45	0.33	0.15

### 2.2.3 Heizsystem

In Abbildung 10 ist der Grundriss des Gebäudes im Dachgeschoß dargestellt. Der Grundriss ist in allen Geschossen identisch, wobei die Wohnungen auf der Ostseite jeweils etwas grösser sind als auf der Westseite. Die benötigte Heizleistung der Räume des Dachgeschoßes im Auslegefall (Aussentemp.  $-8^\circ\text{C}$ ) ist in der Grafik eingezeichnet. In den anderen Geschossen ergibt sich jeweils durch den unterschiedlichen Anteil an Wänden gegenüber der Aussenluft (Dachgeschoß) und dem unbeheizten Keller (Erdgeschoß) ein unterschiedlicher Heizbedarf.

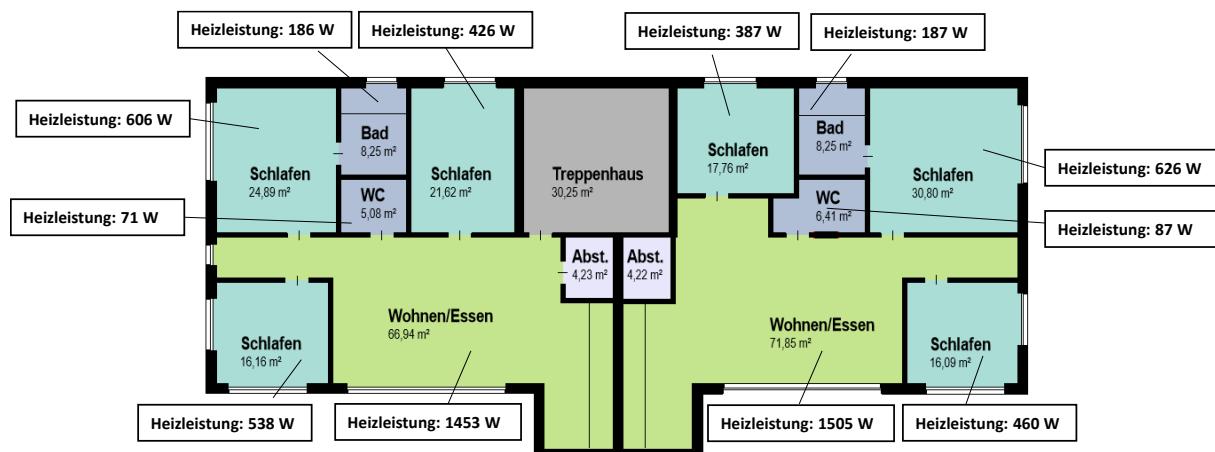


Abbildung 10: Grundriss im Dachgeschoß (2OG) mit Grösse der Räume und Heizleistung im Auslegefall.



Die Raumwärme wird über Fußbodenheizungen (FBH) übertragen. Die Aufteilung auf einzelne Stränge sowie der Verlegeabstand und damit die resultierende Länge der Stränge der Fußbodenheizung ist grafisch im Annex A dargestellt. Die in Abbildung 10 als Schlafzimmer deklarierten Räume sowie Bad und WC werden jeweils mit einem Strang versorgt, wobei mit Ausnahme des WC jeder Raum über ein separates Thermostat verfügt. Ebenfalls mit einem Einzelraumthermostat, aber mit je drei Strängen der FBH wird der Wohnbereich ausgestattet. Der Abstellraum ist unbeheizt.

In Abbildung 11 ist die Rohrlänge der einzelnen Stränge der FBH sowie die ausgelegten Durchflüsse dargestellt.

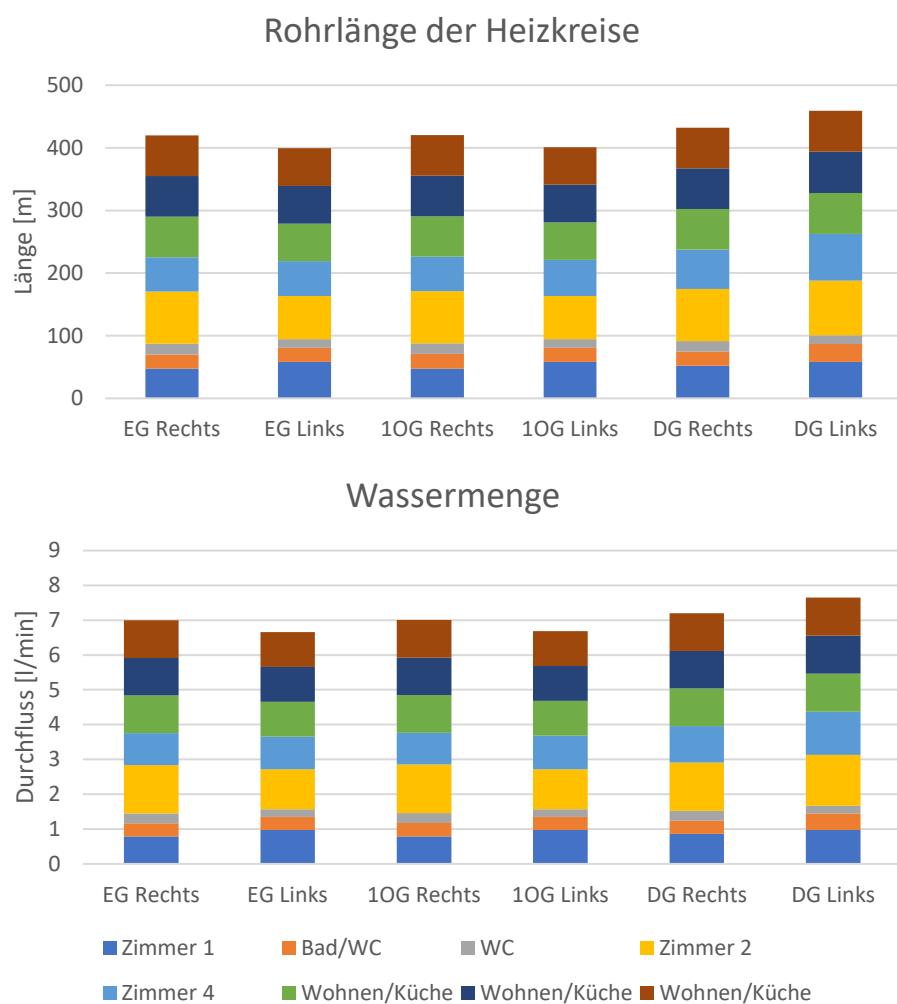


Abbildung 11: Rohrlänge und Durchfluss der einzelnen Heizkreise.

## 2.3 Simulationsmodell

Die Simulationen werden mit der Software TRNSYS in der Version 18 [6] durchgeführt. Wichtigste Komponente ist das Multizone Gebäudemodell (Type 56).



Zur Modellierung wurde ein 3D-Modell des Gebäudes verwendet. Das Gebäude verfügt über 6 Wohnungen mit je 6 thermischen Zonen bzw. Räumen. Die beschriebenen Nutzerprofile werden als interne Lasten verwendet. Die verwendeten Wetterdaten basieren auf einem Datensatz der aus real gemessener Wetterdaten aus den Jahren 1997 bis 2002 erstellt wurde, mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min am Standort Zürich.

Der Wärmebedarf des Gebäudes für die Raumheizung bei idealer Beheizung, mit einer Solltemperatur von 22 °C, beträgt 33.5 MWh. Der Wärmebedarf aufgeteilt auf Wohnungen und Monate, ist in Abbildung 12 zu sehen.

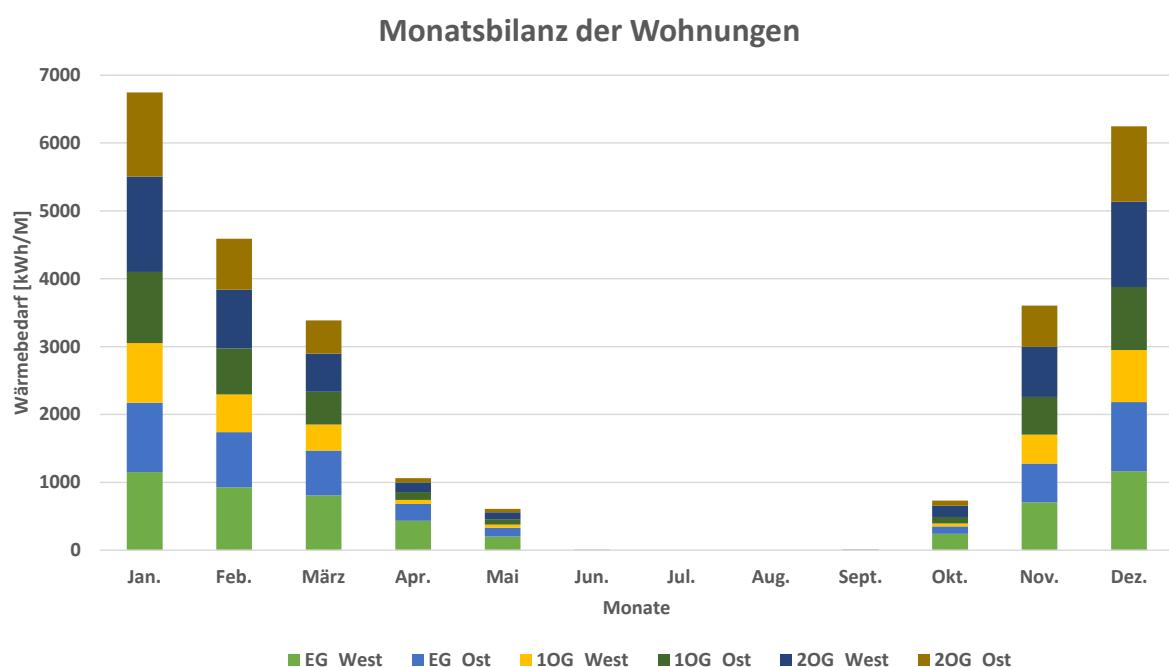


Abbildung 12: Wärmebedarf des Gebäudes bei idealer Heizung, aufgeteilt auf Wohnungen und Monate.

Die Modellierung des Heizsystems erfolgte als externe Komponente [7] für jeden Strang der Fussbodenheizung einzeln. Jede Wohnung wird mit 8 Strängen der Fussbodenheizung beheizt, wobei der Raum «Wohnen/Küche» als einziger mit 3 Strängen erschlossen ist. Die Stränge werden mit physikalischen Daten parametrisiert (Wandaufbau, Materialkennwerte, Typ der Heizungsrohre und Verlegeabstand etc.) und in der Simulation mit eintretendem Massenstrom sowie der Eintrittstemperatur versorgt. Weiterhin werden aus der Gebäudesimulation die Temperaturen der Luft ober- und unterhalb der Geschoßdecke sowie der Oberflächentemperatur der gegenüberliegenden Bauteile übertragen, um die radiative und die konvektive Wärmeübertragung zu berechnen.

Zur Berechnung der Vorlauftemperatur wurde ein Heizsystem, bestehend aus einer Wärmepumpe mit Pufferspeicher, modelliert. Dabei wurde ein vereinfachtes, skalierbares Modell einer nicht modulierenden Wärmepumpe verwendet.



Die Simulationen wurden mit 1-min Zeitschritten durchgeführt. Es wurden kleine Zeitschritte zur Abbildung des eigentlich trägen Heizsystems gewählt, da das Modell später als «Echtzeitmodell» im Hardware-in-the-Loop Tests eingesetzt wird.

In Abbildung 13 ist der Wärmebedarf des Gebäudes mit der modellierten Wärmebereitstellung und -verteilung dargestellt. Mit 40 MWh ist der Gesamtwärmebedarf um knapp 20 % höher als bei idealer Raumheizung. Dies liegt daran, dass die träge Fußbodenheizung mit ihrer hohen thermischen Masse und den simulierten Thermostatventilen nicht exakt auf die geforderte Raumtemperatur von 22°C heizt. Zudem wird mit der eingestellten Heizgrenze von 15 °C vor allem in den Monaten Mai, Juni, September und Oktober zu viel Energie an das Gebäude geliefert.

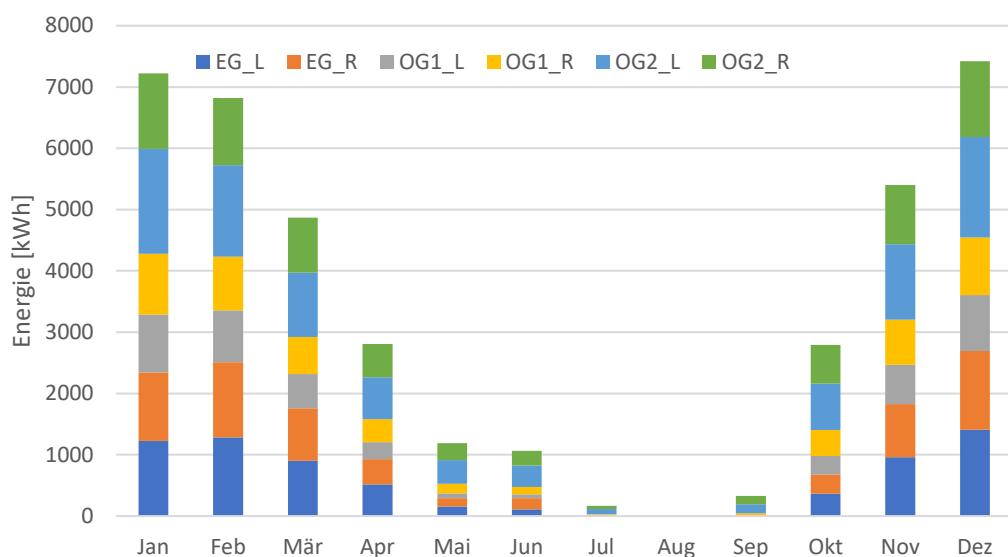


Abbildung 13: Wärmebedarf des Gebäudes mit modellierter Fußbodenheizung, geregelt über Thermostatventile, aufgeteilt auf Wohnungen und Monate.

## 2.4 Testaufbau

### 2.4.1 Hardware-in-the-Loop

Bei einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand kann ein Prüfling durch die Simulation der Umgebung und des Gebäudes wie in einem Feldtest getestet werden. Der Prüfstand verfügt über eine Zentrale Quelle (Wärme- bzw. Kälteversorgung), die Wärme bzw. Kälte an die Emulatoren verteilt. Welche wiederum den Energiebedarf des Gebäudes auf den Prüfling emulieren. Der Kombiteststand des SPF verfügt über vier dieser thermische Emulatoren. Die Simulation erfolgt über TRNSYS und die Verarbeitung der Messwerte sowie die Kommunikation zwischen Hardware und Simulation über die am SPF entwickelte Software CombiVIEW.



Es wurde das oben beschriebene Modell mit je 8 Heizsträngen pro Wohnung verwendet. Im Versuch soll der Heizkreisverteiler einer Wohnung getestet werden, folglich wird diese Wohnung im Detail am Prüfstand emuliert, während die restlichen Wohnungen rein virtuell dargestellt werden.

In Abbildung 14 ist das Prinzipschema des Testaufbaus aufgeführt. Als Quelle wird ein Kältespeicher über eine Wärmepumpe beladen. Diese liefert Kälte an die Emulatoren, welche die im Labor aufgebauten Heizkreise der Wohnung kühlen. Über den Emulator A, der über ein Konditionierungskreislauf zum Heizen und Kühlen verfügt, wird die Wärmebereitstellung im Gebäude (Wärmepumpe und Pufferspeicher) emuliert. Der Energiebedarf des Gebäudes wird über die Steigleitung an die einzelnen Wohnungen verteilt. In der Steigleitung ist eine Heizkreispumpe und die Verteilung zu den Wohnungen installiert. Da jedoch nur eine Wohnung im Detail getestet wird, werden die anderen Wohnungen über nur eine Verteilung mit Regelventil nachgestellt. Die Verteilung der anderen Wohnung geht auf den Vorlauf des Prüflings und von dort auf die Verteilung in den einzelnen Heizsträngen, welche über Emulator E emuliert werden. Dieser verfügt über acht Stränge, um die FBH in der Wohnung abzubilden. Der Wärmebedarf des Gebäudes wird über Emulator B nachgestellt, der über einen Kreislauf zum Kühlen verfügt. Folglich nimmt Emulator B die Wärme aus den einzelnen Heizsträngen in Emulator E auf und führt diese ab.

Der Prüfling besteht aus einem Heizkreisverteiler in Kombination mit Raumthermostaten. Die Raumthermostaten messen die Temperatur in den einzelnen Räumen der Wohnung und übergeben diese Information an den Heizkreisverteiler. Die Emulation der Temperatur erfolgt über Temperatursimulationsboxen. Steigleitung, Emulator E und Temperatursimulationsboxen wurden für das HydAb Projekt neu konzipiert und aufgebaut. Eine genaue Beschreibung erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

Die Software CombiVIEW verarbeitet Messwerte und ist Schnittstelle zwischen der installierten Hardware (Emulatoren) und der Gebäudesimulation. CombiVIEW reagiert auf Vorgaben aus der Simulation bzw. liefert aufgrund von Messwerten Informationen an die Simulation. Hierdurch entsteht ein dynamischer Test.

Der Prüfling bleibt für den Prüfstand eine Art Blackbox, es wird daher nicht in das Verhalten des Prüflings eingegriffen.

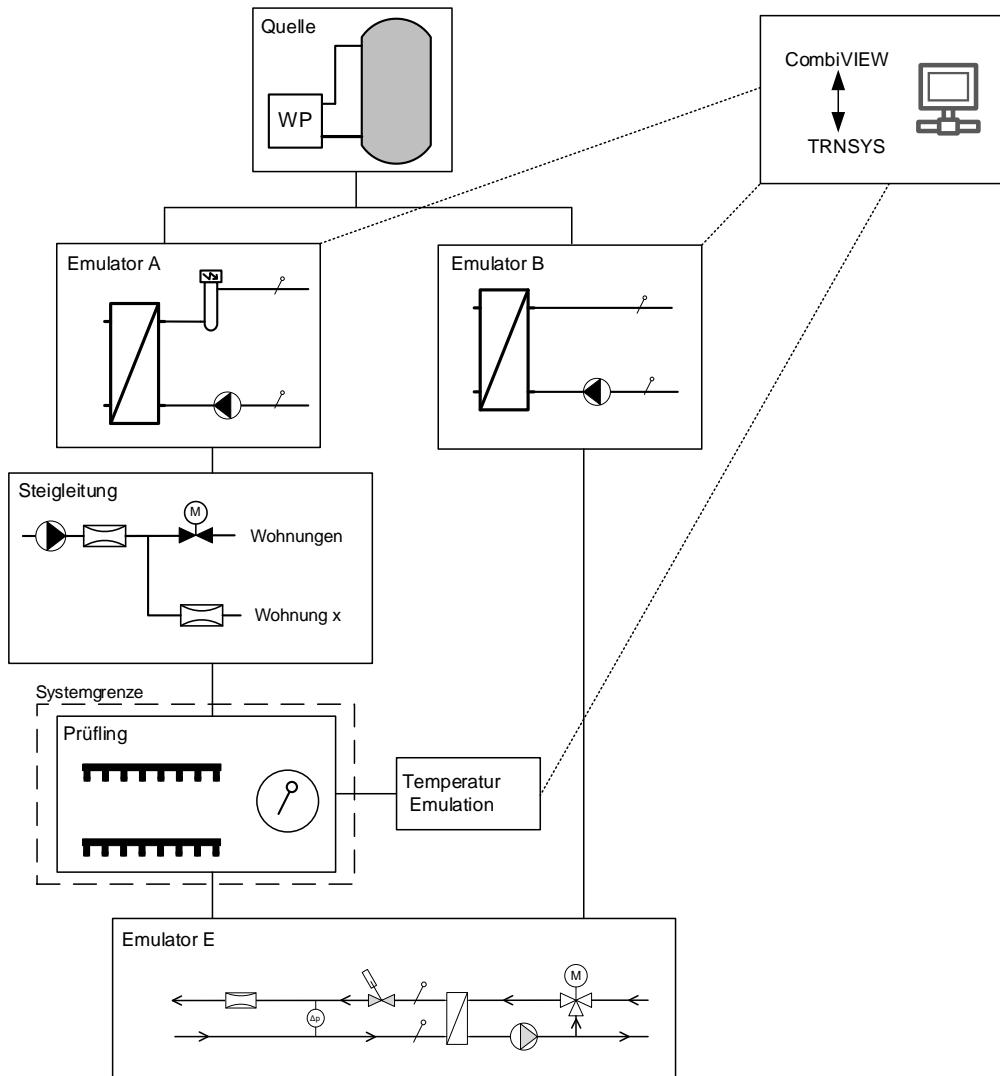


Abbildung 14: Prinzipschema des Prüfstands.

## 2.4.2 Steigleitung

Über die Steigleitung wird die Wärme aus Emulator A an die Wohnungen verteilt. Das Hydraulikschema der Umsetzung am Prüfstand ist in Abbildung 15 dargestellt. Im Vorlauf ist eine Heizkreispumpe ( $P_{hzg}$ ) Magna3 32-100 von Grundfos installiert. Da am Prüfstand nur eine Wohnung des Gebäudes abgebildet wird, verfügt die Steigleitung nur über zwei Abgänge. Ein Abgang führt über einen Volumenstrommesser ( $\dot{V}_{whg,x}$ ) auf den Prüfling. Der Zweite bildet über das Regelventil ( $V_{whg}$ ) alle anderen Wohnungen ab. Dabei wird das Ventil so geregelt, dass der Volumenstrom in diesem Strang dem aus der Simulation vorgegebenen Volumenstrom aller anderen Wohnungen entspricht. Es erfolgt jedoch keine direkte Messung des Volumenstroms, vielmehr ergibt sich der Volumenstrom aus der Differenz des Gesamtstroms ( $\dot{V}_{hzg}$ ), gemessen im Emulator A) und  $\dot{V}_{whg,x}$ .

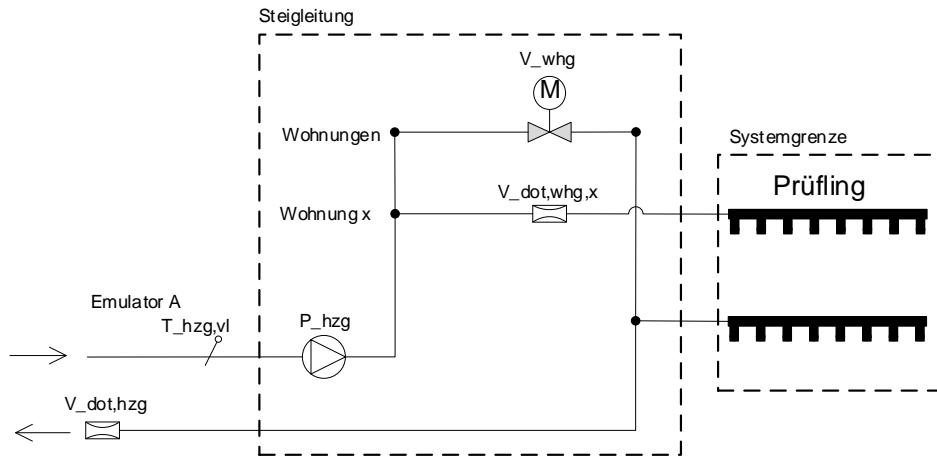


Abbildung 15: Hydraulikschema der Steigleitung.

#### 2.4.3 Emulator E

Die vom Emulator A bereitgestellte Wärme wird über den Prüfling an die Primärseite im Emulator E verteilt, wo der Wärmebedarf des Gebäudes emuliert wird. Der Emulator verfügt über insgesamt 8 Stränge, ein Strang je Heizkreis der Wohnung. In Abbildung 16 ist ein Ausschnitt, mit einem Strang, des Hydraulikschemas abgebildet. Zentrales Element ist ein Wärmetauscher über den die von der Bodenheizung an den Raum abgegebene Wärme emuliert wird. Auf der Primärseite des Wärmetauschers werden über den TA-Smart von Imi Hydronic ( $TAS_{str,i}$ ) die Vor- und Rücklauftemperatur ( $T_{str,i,vl}$ ,  $T_{str,i,rl}$ ) den Druckverlust zwischen Vor- und Rücklauf ( $\Delta p_{str,i}$ ), sowie der Volumenstrom ( $\dot{V}_{str,i,l}$ ) gemessen. Über das im TA-Smart vorhandene Strangregulierventil wird der Druckverlust der Fußbodenheizung eingestellt. Zusätzlich wird der Volumenstrom über den TEZ von Belimo ( $\dot{V}_{str,i,B}$ ) gemessen.

Die vom Emulator B gelieferte Kälte wird im Emulator E über einen Verteilbalken (Multidis SH, Oventrop) an die Sekundärseite der einzelnen Stränge verteilt. Auf der Sekundärseite sind eine ungeregelte DC Pumpe (P), sowie ein Regelventil ( $V_{str,i}$ ) installiert. Über den Wärmetauscher wird die Rücklauftemperatur auf der Primärseite  $T_{str,i,rl}$  auf einen Sollwert geregelt. Der Sollwert kann für alle 8 Stränge unterschiedlich sein. Da Emulator B am Vorlauf der Sekundärseite für alle 8 Stränge die gleiche Temperatur liefert, wird über  $V_{str,i}$  durch Rücklaufbeimischung für alle Stränge eine unterschiedliche Rücklauftemperatur erreicht.

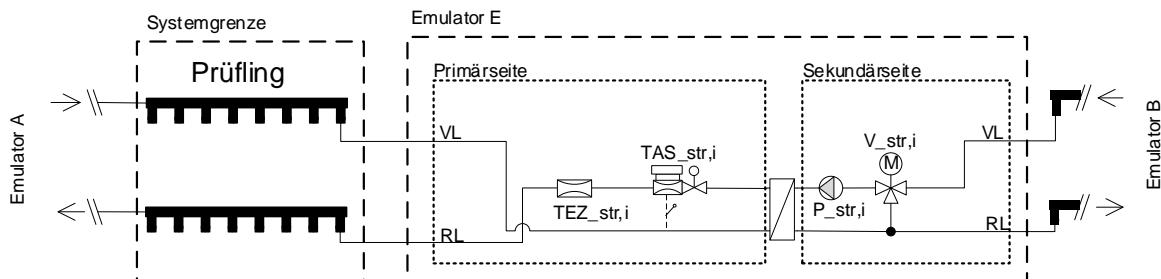


Abbildung 16: Detailausschnitt Emulator E, abgebildet ist nur einer der insgesamt 8 Stränge.



Abbildung 17 zeigt vier Stränge des Emulators, die weiteren vier Stränge befinden sich auf der Rückseite des Gestells. Die Primär- und Sekundärseite sind mit einer Festverrohrung realisiert und die Verbindung zum Prüfling bzw. zu Emulator B wurde jeweils mit flexiblen Schläuchen ausgeführt. Dies erlaubt einen einfachen Wechsel zwischen den verschiedenen Prüflingen. Alle Schläuche auf der Primärseite haben die gleiche Länge. Das vollständige Hydraulikschema von Steigleitung und Emulator E befindet sich in 7Annex C.

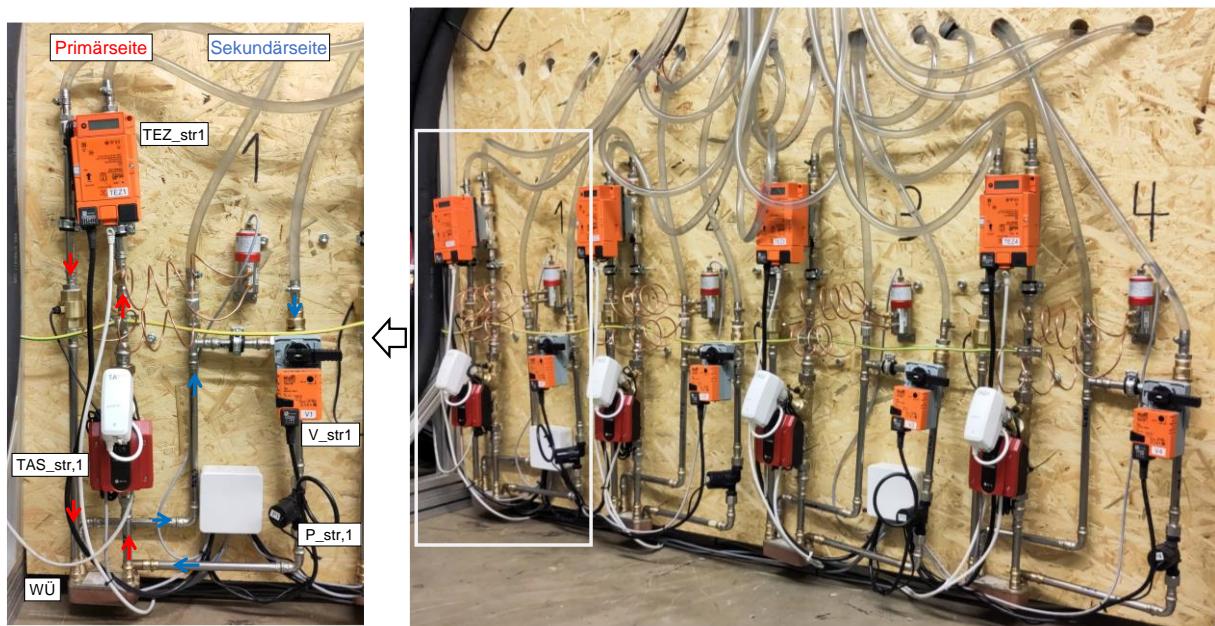


Abbildung 17: Aufbau Emulator E, links: Ansicht von Strang 1, rechts: Strang 1-4.

#### 2.4.4 Temperatursimulationsboxen

Jede Temperatursimulationsbox emuliert die Temperatur eines Raumes im Gebäude. Die Solltemperaturen stammen aus der TRNSYS-Simulation des Gebäudes. Der Sollwert wird über eine LabVIEW-Software an die Box übertragen. In der Box wird über einen Sensor die Ist-Temperatur gemessen und mit dem Sollwert verglichen. Stimmen die beiden Werte nicht überein, wird der Innenraum der Box entweder gekühlt oder geheizt.

In der Temperatursimulationsbox befinden sich auch die Raumthermostate des jeweiligen Produkts, das vermessen wird. Diese geben dann die Temperaturen an die Steuereinheit der Heizkreise weiter.

##### 2.4.4.1 Aufbau

Die Temperatursimulationsboxen sind mehrschichtig aus Styroporplatten zusammengesetzt. Die Außenmasse der Box sind  $25 \times 25 \times 37 \text{ cm}^3$ , die Innenmasse  $13 \times 13 \times 21 \text{ cm}^3$  (HxBxL).

Auf der rechten Seite der Box befindet sich, wie in Abbildung 18 zu sehen, ein Peltier-Element. Mit diesem kann der Raum in der Box je nach Bedarf gekühlt oder geheizt werden. Auf beiden Seiten des Peltier-Elements befinden sich ein Wärmetauscher und ein Ventilator, um die Energie am Peltier-Element abzuführen und die Luft in der Box zu verteilen.



Auf der linken Seite der Box in Abbildung 18 befinden sich der Temperaturfühler und der Raumthermostat.



Abbildung 18: Bild einer der 5 Temperatursimulationsboxen. Zu sehen ist auf der rechten Seite der äussere Ventilator der die Wärme (beim Kühlen der Box) oder die Kälte (beim Erwärmen der Box) abführt.

#### 2.4.4.2 Steuerung

Abbildung 19 zeigt die Steuerungslogik der Temperatursimulationsboxen. Die beiden Ventilatoren und der Peltier-Kontroller (Controller-TEC) werden über eine 24V-Spannungsquelle versorgt. Der Peltier-Kontroller nimmt Steuersignale auf und gibt den gewünschten Strom in der gewünschten Fliessrichtung an das jeweilige Peltier-Modul weiter.

Das Digital OUT1 Signal gibt die beiden Ventilatoren sowie den Peltier-Kontroller frei. Das Temp IN Signal misst die Ist-Temperatur in der Temperatursimulationsbox. Auf Grund der Ist- und Soll-Temperatur wird ein Analogsignal zwischen 0 und 10 V (Analog OUT) für den Strombedarf sowie ein Digitalsignal (Digital OUT2) für die Stromrichtung (heizen / kühlen) an den Kontroller gesendet. Das Analogsignal wird dann im Kontroller in einen Strom zwischen 0 und 2 Ampere umgewandelt und an das Peltier-Element geleitet.

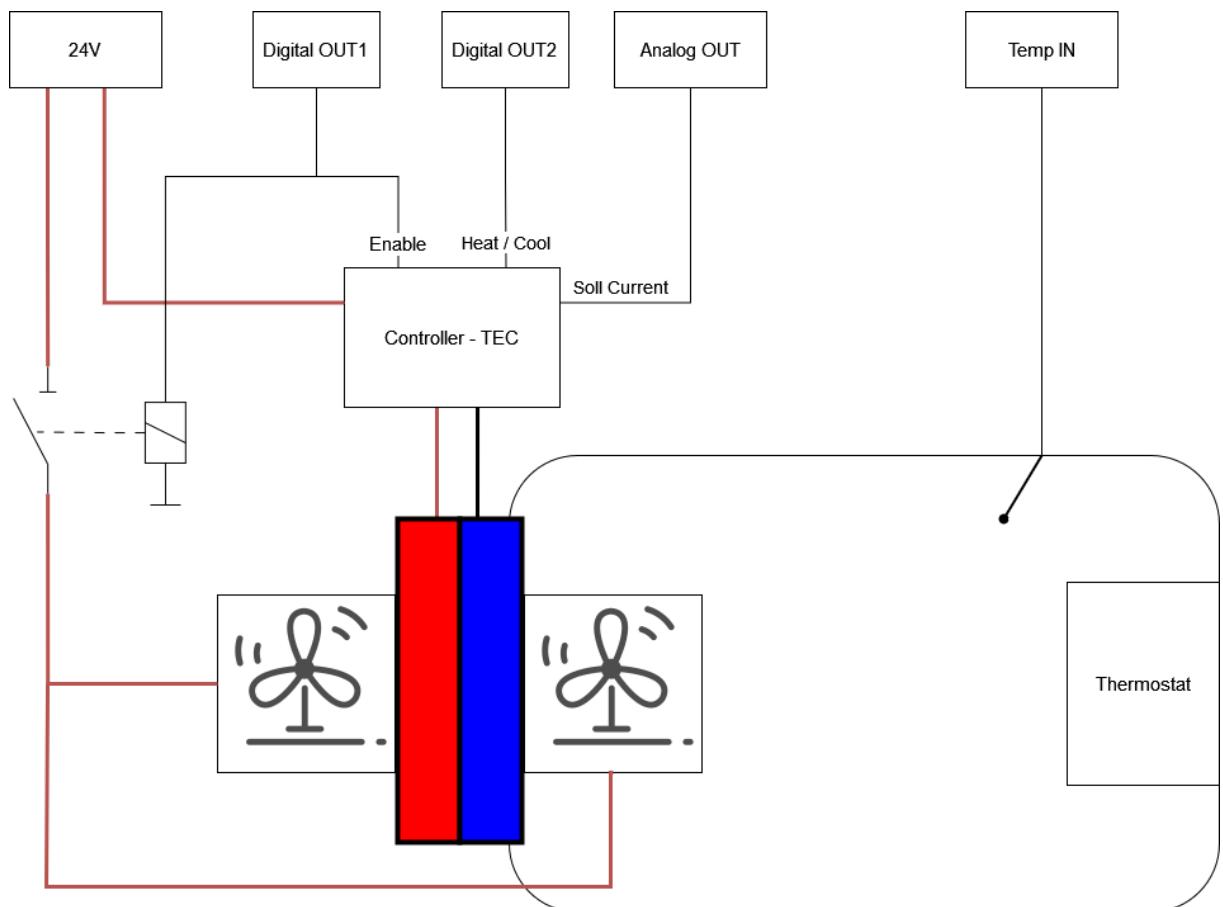


Abbildung 19: Vereinfachtes Elekroschema der Temperatursimulationsboxen. Das Peltier-Element wird als rot-blau Rechteck dargestellt. Digitale und analoge Outputs sowie die Temperaturmessung werden über ein LabVIEW-Programm gesteuert und ausgelesen.



## 2.4.5 Messstellen

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht aller relevanten Messstellen aufgeführt. Die verwendeten Messmittel sind für alle Stränge im Emulator E identisch, weshalb sie nur einmal aufgeführt sind. Der Index i bezieht sich auf den jeweiligen Strang. Analog hierzu ist der Aufbau der Temperatursimulationsboxen identisch und der Index j bezieht sich auf den jeweiligen Raum.

Tabelle 11: Übersicht über Messgrößen, Messprinzip und Unsicherheiten.

Name	Einheit	Beschreibung	Messprinzip	Standard-abweichung u
$\dot{V}_{hzg}$	l/h	Volumenstrom Heizung Gesamt, gemessen in Emulator A	Coriolis	0.1 %
$T_{hzg,vl}$	°C	Vorlauftemperatur Heizung, gemessen in Emulator A	4-Leiter Pt100	0.1 K
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz, Temperaturfühler paarweise kalibriert. Deshalb kann die systematische Unsicherheit des Kalibrators für die Differenz abgezogen werden.	4-Leiter Pt100	0.03 K
$\dot{V}_{whg,x}$	l/h	Volumenstrom Wohnung x, gemessen in Steigleitung	Coriolis	0.1 %
$T_{str,i,vl}$	°C	Vorlauftemperatur, Strang i	PT1000	$\pm 0.15 \text{ K} @ \Delta T = 10 \text{ K}$
$T_{str,i,rl}$	°C	Rücklauftemperatur, Strang i	PT1000	$\pm 0.2 \text{ K} @ \Delta T = 20 \text{ K}$
$\Delta p_{str,i}$	K	Druckdifferenz, Strang i	Differenzdruck	<2,5 kPa
$\dot{V}_{str,i,I}$	l/h	Volumenstrom Strang i, gemessen mit TA-Smart (Imi)	Ultraschall	$\pm 2\% \text{ bei } 5\dots 100\% q_{nom}$
$\dot{V}_{str,i,B}$	l/h	Volumenstrom Strang i, gemessen mit TEZ (Belimo)	Ultraschall	$\pm (2 + 0.02 q_{nom}/q)\% \text{ des gemessenen Werts (q), (max. } \pm 5\%)$
$T_{raum,j}$	°C	Emulierte Raumtemperatur	4-Leiter Pt100	0.1 K



## 2.5 Testzyklus und Vergleichskriterien

### 2.5.1 Testzyklus

Das Konzept des Tests basiert auf einem Zyklus, der einen realitätsnahen Betrieb der geprüften Komponenten gewährleistet. Dabei ist darauf zu achten, dass der Test auf relevanten Randbedingungen basiert. In Abbildung 20 sind die Wetterdaten des verwendeten Datensatzes für das gesamte Jahr als Tagesmittelwerte dargestellt.

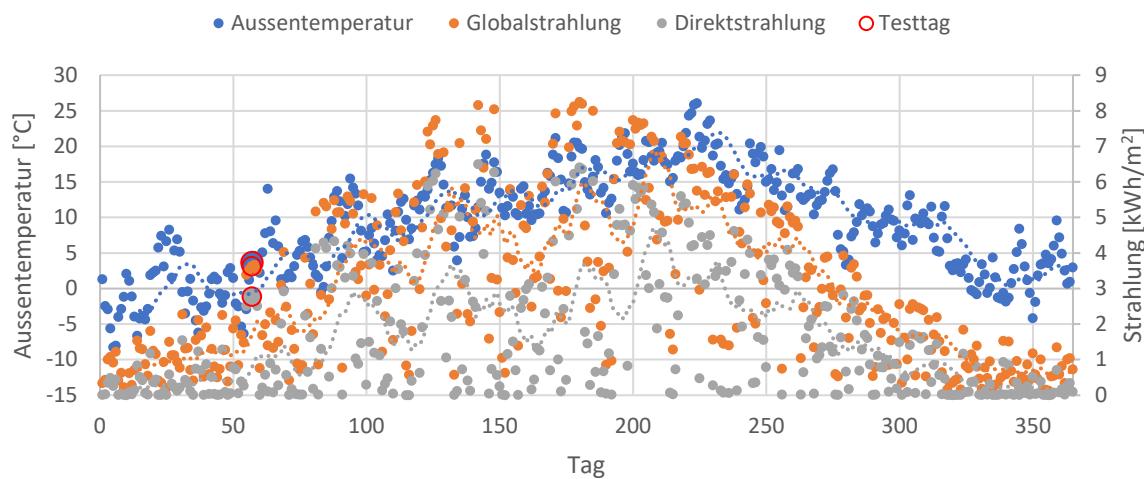


Abbildung 20: Tagesmitteltemperaturen und tägliche Strahlungssummen des verwendeten Klimadatensatzes. Der gewählte Testtag ist mir roter Umrandung markiert.

Bei der Messung von Systemen zur Regelung der Raumtemperatur und zum hydraulischen Abgleich ist es wichtig, dass im Gebäude phasenweise der maximale Volumenstrom gefordert wird. Nur in diesem Zustand kann die effektive Begrenzung des Durchsatzes auf einen Sollwert überprüft werden. Zudem sollte der Raumwärmeverbrauch nicht konstant sein, um das dynamische Verhalten der Steuerung und Komponenten bewerten zu können. Ein weiteres Kriterium ist die Möglichkeit, den Test als sogenannten «Concise Cycle» zu betreiben (Concise Cycle Test, CCT [8]), also eine nahtlose Wiederholung des Tests als eine Schleife.

Aus dem gezeigten Wetterdatensatz erfüllt der Tag 57 diese Bedingungen am besten. Kalte Aussentemperaturen während der Nacht erfordern eine hohe Heizleistung im Gebäude. Die hohen passiven Gewinne durch die Sonneneinstrahlung am Nachmittag erfordern eine Reaktion der Heizkreisverteiler. Die Wetterdaten sind in Abbildung 21 zu sehen.

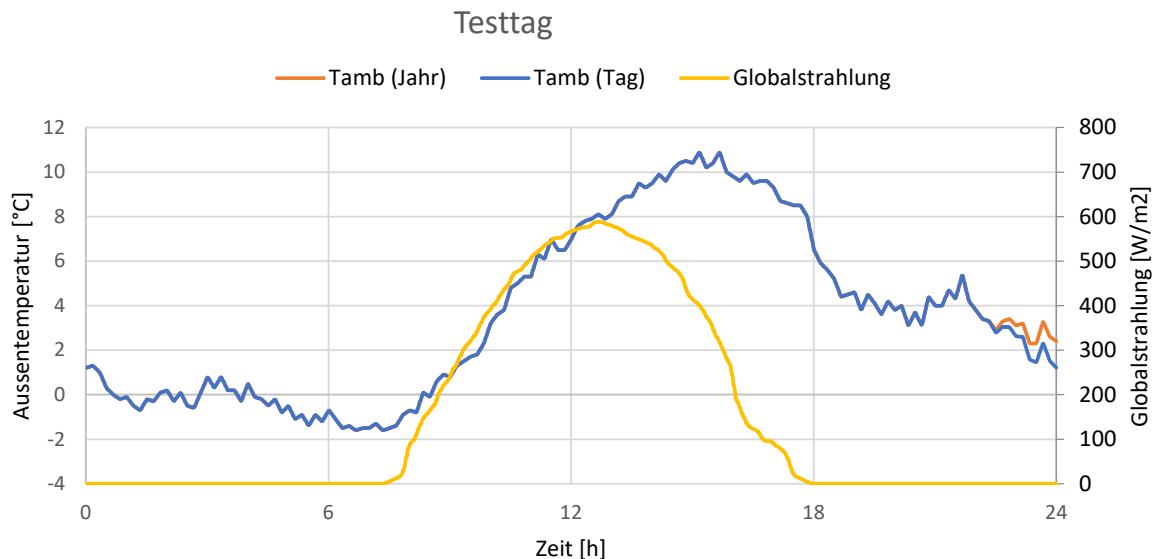


Abbildung 21: Wetterdaten des Testtages. In Blau ist die angepasste Aussentemperatur des Prüfzyklus zu sehen mit identischer Temperatur zu Beginn und Ende des Tages. Der Orange eingezeichnete Teil aus den Originaldaten wurde ersetzt.

Zur Bewertung der energetischen Effizienz der Heizwärmeabgabe wird die Vorlauftemperatur, bzw. die Heizkurve ermittelt, welche nötig ist, um die Solltemperatur in jedem Raum des Gebäudes sicher gewährleisten zu können. Wie oben beschrieben, wird dazu die Wohnung auf der Ostseite im Erdgeschoss am Prüfstand nachgebildet. Es wird ein 24-h Zyklus aus einem kalten Wintertag appliziert. Die resultierenden Massenströme in dieser Wohnung haben einen Einfluss auf das gesamte Gebäude. Die am weitesten entfernten Wohnungen sind diejenigen im 2. OG, welche gleichzeitig auch den höchsten Wärmebedarf aufweisen.

Der Bedarf an elektrischer Energie zum Betrieb der dem Test hinterlegten Wärmepumpe wird vorab über Jahressimulationen mit verschiedenen Heizkurven bestimmt. Aus der Wärmelieferung während des Tests und der Heizkurve kann dann der resultierende Jahresstromverbrauch bestimmt werden.

Zusätzlich zum dynamischen Test unter realitätsnahen Bedingungen wird ein Stationärer Test unter sich ändernden Randbedingungen durchgeführt. Dazu werden im ersten Schritt die Temperatursimulationsboxen auf eine Temperatur von 20 °C, und somit tiefer als der Sollwert in den Räumen, eingestellt. Entsprechend sollten alle Stellmotoren voll geöffnet sein sodass sich der maximale Volumenstrom in den einzelnen Strängen einstellt. Danach werden zunächst einzelne Temperatursimulationsboxen und dann Kombinationen mehrerer Temperatursimulationsboxen für jeweils 2 Stunden auf 23 °C gestellt, sodass die zugehörigen Stränge durch die Thermostate abgeregelt werden. Dieser Test wird unter veränderten Pumpeneinstellungen der Heizkreispumpe wiederholt, um die Reaktion des Systems auf veränderte Druckverhältnisse aufnehmen zu können.



### 2.5.2 Bewertung des thermischen Komforts

Eine Bewertung der Behaglichkeit, resultierend aus der operativen Temperatur und möglicher ungleichmässiger Oberflächentemperatur der Fussbodenheizung ist nicht möglich. Diese hängt in Realität stark von den Verlegeabständen der Rohre der Fussbodenheizung ab, welche nicht Gegenstand der Untersuchung sind. Ein nicht konstanter Wärmeeintrag in die Räume sowie allfällige Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen können dagegen bestimmt (resp. simuliert) werden, zumal die Randbedingungen bzw. das virtuelle Gebäude und das Nutzerverhalten für jeden Test identisch sind. Entsprechend basiert die Bewertung des Komforts in der vorliegenden Studie auf der Regelgüte der Thermostatventile, welche Teil der Prüflinge sind.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Simulationsresultate

#### 3.1.1 Referenzsystem

Im Folgenden werden die Resultate der Jahressimulation des Gebäudes unter den in Kapitel 2.1 beschriebenen Bedingungen, insbesondere der ausgelegten Massenströme der FBH dargestellt.

Die simulierten Thermostatventile regeln den Massenstrom im Maximum exakt auf den parametrisierten maximalen Durchsatz pro Strang. Entsprechend ist der hydraulische Abgleich im Simulationsmodell ideal. Der resultierende Durchsatz pro Strang ist in Abbildung 22 für die westliche Erdgeschosswohnung auf Monatsbasis dargestellt. 50% aller Werte des jeweiligen Monats liegen innerhalb der Box (zweites und drittes Quartil), der Stern zweigt jeweils den Median des Massenstroms. Die Darstellung für alle Wohnungen des MFH ist im Anhang zu sehen.

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind Energie-Temperatur-Diagramme der FBH zu sehen. Dazu wurde die an die FBH gelieferte Energie jeweils nach der Vor- und Rücklauftemperatur sortiert.

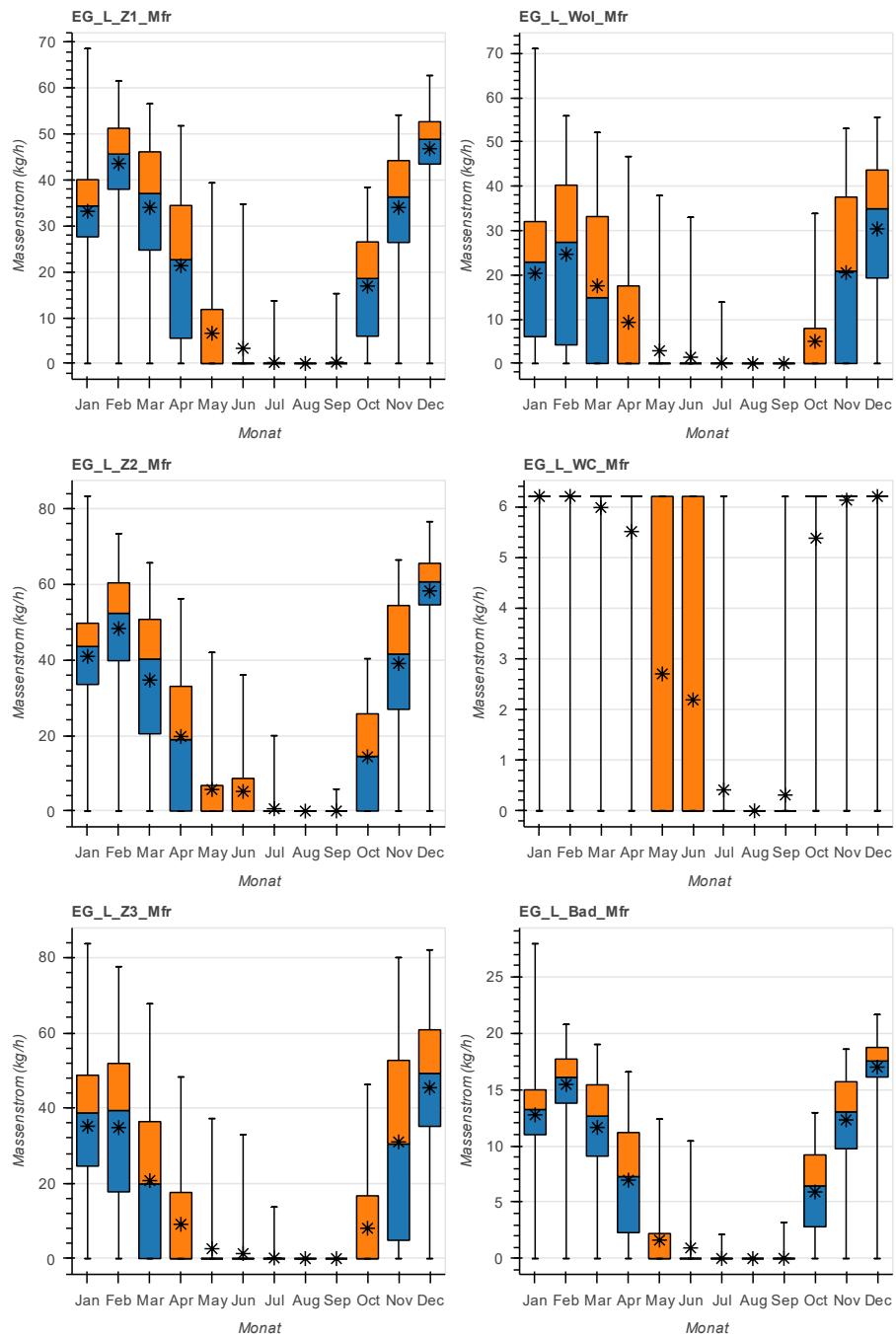


Abbildung 22: Boxplots der Massenströme in den einzelnen Strängen der FBH der westlichen Erdgeschoßwohnung. Der Massenstrom des Stranges «Wol» steht exemplarisch für die drei identischen Stränge im Raum «Wohnen und Küche».

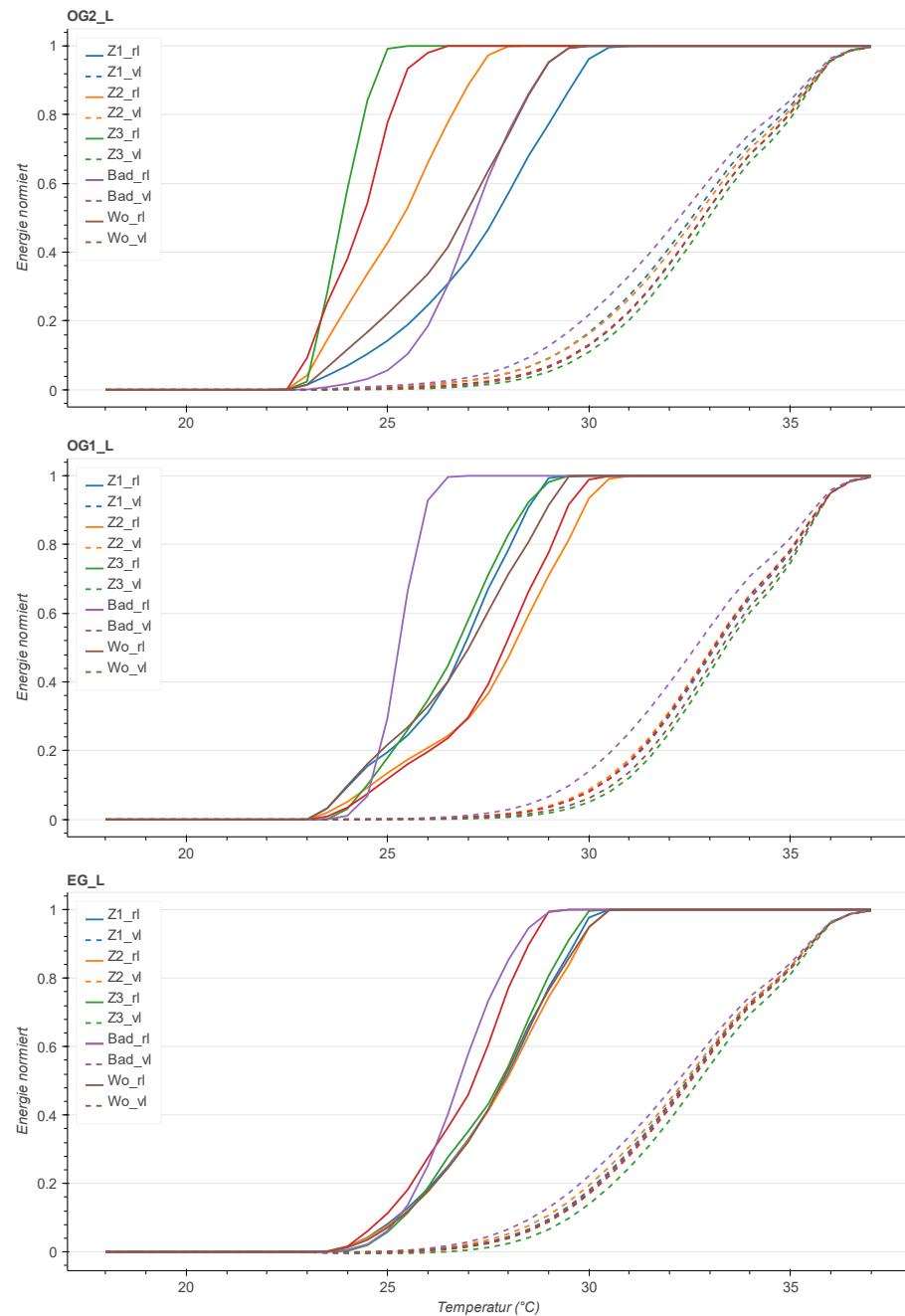


Abbildung 23: Energie-Temperatur Diagramme der FBH in den westlichen Wohnungen des MFH.

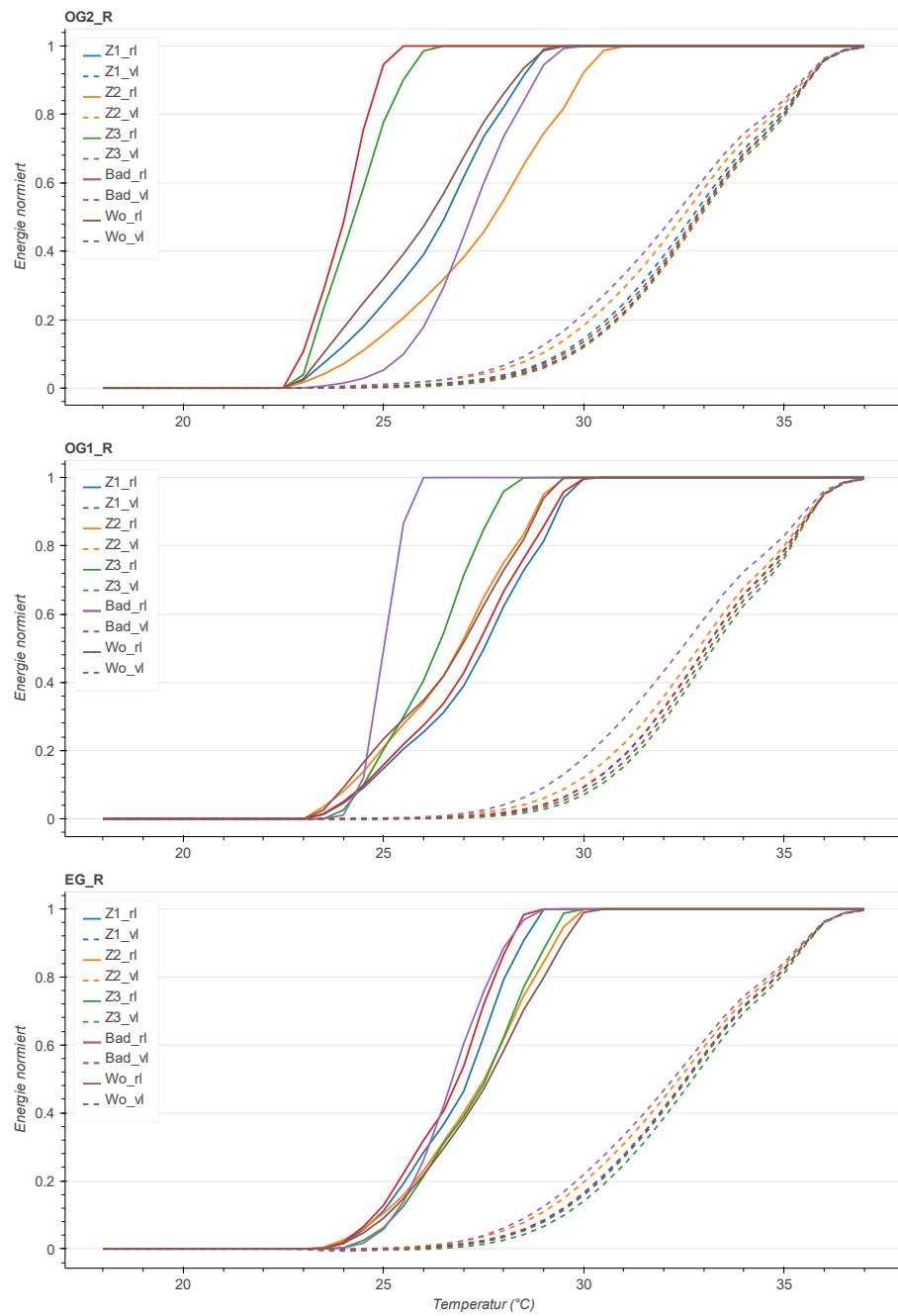


Abbildung 24: Energie-Temperatur Diagramme der FBH in den östlichen Wohnungen des MFH.



### 3.2 Testergebnisse

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch keine finalen Testresultate vor.

### 3.3 Potentialanalyse

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch keine publizierbaren Resultate vor.



## 4 Schlussfolgerungen und Fazit

Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch keine publizierbaren Schlussfolgerungen vor.

## 5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

### 5.1 Projektplan 2025

Im Jahr 2025 werden mehrere Arbeitspakete parallel durchgeführt. Diese umfassen:

- **AP4:** Test von unterschiedlichen Systemen
- **AP5:** Potenzialanalyse der Vorlauftemperatur und Heizgrenze
- **AP6:** Durchführung von Workshops
- **AP7:** Erstellung von Factsheets und Resultaten

Das Ende des Projektes ist für das Ende des zweiten Quartals geplant, wobei ein Puffer bis zum Ende des Jahres eingeplant war. In Abbildung 25 ist das Gantt Diagramm aus der Projektplanung zu sehen.

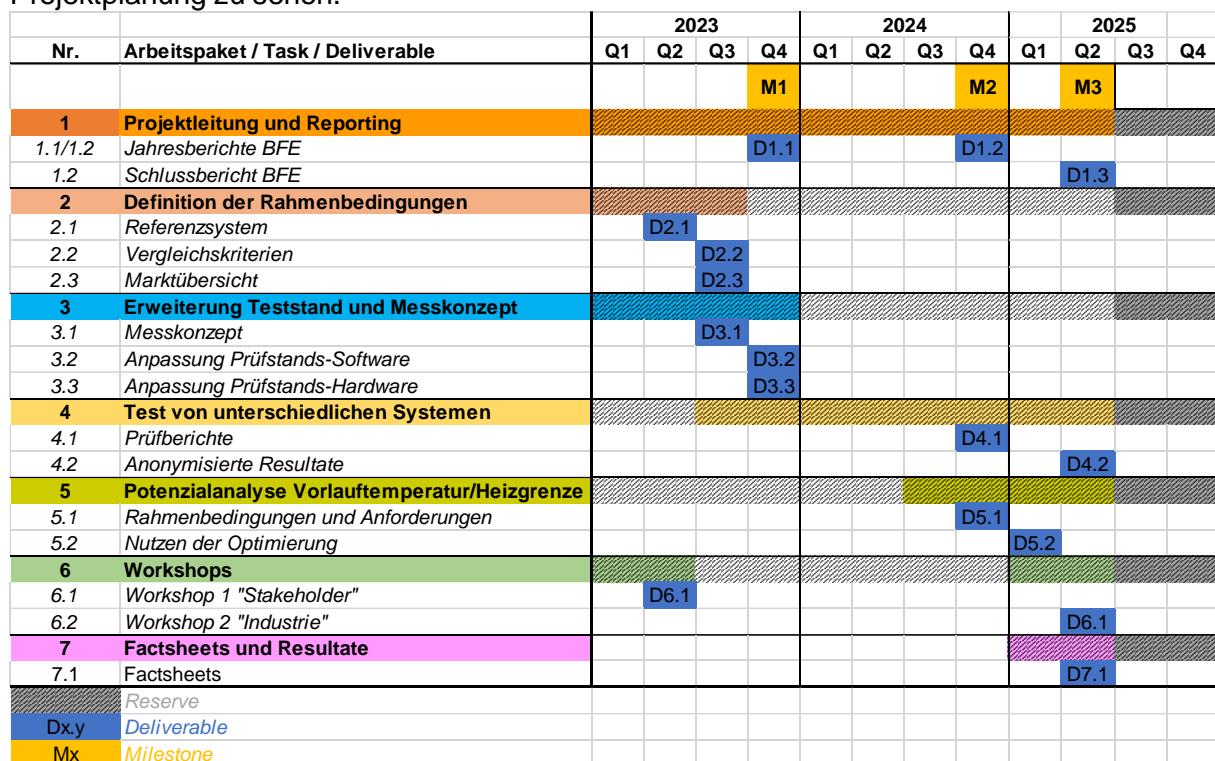


Abbildung 25: Gantt Diagramm des Projektes.



## 5.2 Aktueller Stand

- **AP4:** Es gibt Verzögerungen im Arbeitspaket 4. Die Messungen werden voraussichtlich erst Ende des dritten Quartals 2025 abgeschlossen sein.
- **AP5:** Die Potenzialanalyse wird derzeit mit Simulationsvarianten durchgeführt, die auf den ersten Testergebnissen basieren. Dieses Arbeitspaket wird zeitgleich mit AP4 abgeschlossen.
- **AP6 und AP7:** Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 4 und 5 werden in Workshops und Factsheets veröffentlicht. Die Planung der passenden Termine für diese Veröffentlichungen muss in naher Zukunft erfolgen, um genügend Vorlaufzeit zu gewährleisten.

Aufgrund der Verzögerungen im AP4 muss der eingeplante Puffer in Anspruch genommen werden. Ein denkbarer Projektabschluss ist somit im Oktober 2025.

## 6 Kommunikation

Welche Kommunikationsmassnahmen und zielgruppenspezifischen Kanäle sind für die Diffusion der Ergebnisse vorgesehen?

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Crameri S. EFH und MFH Referenzgebäude für Simulationen. Luzern: HSLU; 2019.
- [2] Konferenz kantonaler Energiedirektoren, editor. Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014) 2018.
- [3] Pflugradt N. Load Profile Generator Version 1.3.5 2010.
- [4] SN EN ISO 7730:2006: 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 (ISO 7730:2005). Genf: 2006.
- [5] SIA 380/1:2009: Thermische Energie im Hochbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; 2009.
- [6] Klein et al SA. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA 2017. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>.
- [7] Battaglia M. TRNSYS - Type 1792 – Radiant Floor - Version 1.00. Internes Dokument 2017.
- [8] Haberl R, Reber A, Haller MY. Concise Cycle Test - Beschreibung der Prüfmethode 2018.  
[https://www.spf.ch/fileadmin/user\\_upload/spf/Testing/Systeme/Kombisysteme/SPF\\_CCT-Methode\\_v1.0.pdf](https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/Testing/Systeme/Kombisysteme/SPF_CCT-Methode_v1.0.pdf) (accessed November 25, 2018).



## Annex A: Gebäudedaten

### Gebäudehülle

Die opaken Elemente des Gebäudes sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12 Zusammenfassung der opaken Elemente.

Elemente	U-Werte [W/m <sup>2</sup> K]
Aussenwand zu Umgebung	0.28
Kellerwand	0.39
Innenwand gegen unbeheizte Räume	0.34
Innenwand zwischen Wohnungen	0.63
Boden gegen Erde	0.26
Boden gegen unbeheizte Räume	0.24
Boden gegen beheizte Räume	0.66
Dach	0.26

Die globalen Fensterparameter sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13 Die globalen Fensterparametern.

U <sub>g</sub>	0.7 [W/m <sup>2</sup> K]
U <sub>f</sub>	0.9 [W/m <sup>2</sup> K]
g-Wert	0.45 [-]

Die Fensterflächen für das Gebäude sind in Tabelle 14 detailliert dargestellt.

Tabelle 14 Fensterflächen.

	Fensterfläche	Glasfläche	Fensterverhältnis zur Fassade
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]
Norden	48.0	40.8	17.9 %
Osten	26.4	22.3	21.2 %
Süden	166.8	148.4	62.2 %
West	26.4	22.3	21.2 %
Total	267.6	233.8	22.8 %



## Annex B: Auslegung Fussbodenheizung

Tabelle 15: Auslegung Fussbodenheizung.

Raum	Fläche	Wärmebedarf	Wasser- menge	Verlege- abstand	Rohrlänge des Heizkreises	Dynamischer Druck	Druck- verlust
[ - ]	[m <sup>2</sup> ]	[W]	[kg/h]	[cm]	[m]	[Pa]	[Pa]
Erdgeschoss Ost							
Z1	17.6	527.8	64.8	20.0	88.0	12.7	1821.2
Bad	8.3	236.6	29.1	20.0	41.5	2.5	406.1
WC	6.3	59.8	7.3	35.0	18.0	0.2	133.8
Z2	30.8	780.0	95.8	25.0	123.2	27.7	9398.4
Z3	16.0	691.6	84.9	15.0	106.7	21.8	2555.5
Wol	24.0	601.0	73.8	25.0	95.9	16.4	4770.9
Woll	24.0	601.0	73.8	25.0	95.9	16.4	4770.9
WollII	24.0	601.0	73.8	25.0	95.9	16.4	4786.2
Erdgeschoss West							
Z1	21.6	568.1	69.8	25.0	86.4	14.7	2194.7
Bad	8.3	231.4	28.4	20.0	41.5	2.4	406.1
WC	5.0	50.7	6.2	35.0	14.3	0.1	84.0
Z2	25.5	690.3	84.8	25.0	102.0	21.7	5642.2
Z3	16.2	692.9	85.1	15.0	108.0	21.8	2622.1
Wol	22.2	588.5	72.3	25.0	88.9	15.8	4525.6
Woll	22.2	588.5	72.3	25.0	88.9	15.8	4525.6
WollII	22.2	588.5	72.3	25.0	88.9	15.8	4511.3
1. Obergeschoß Ost							
Z1	17.6	242.0	29.7	35.0	50.3	2.7	1040.7
Bad	8.3	114.0	14.0	35.0	23.7	0.6	239.7
WC	6.3	32.0	3.9	35.0	18.0	0.0	133.8
Z2	30.8	377.0	46.3	35.0	88.0	6.5	6713.2
Z3	16.0	404.0	49.6	20.0	80.0	7.4	1916.6
Wol	24.0	306.3	37.6	35.0	68.5	4.3	3407.8
Woll	24.0	306.3	37.6	35.0	68.5	4.3	3407.8
WollII	24.0	306.3	37.6	35.0	68.5	4.3	3418.7



---

1. Obergeschoß West

Z1	21.6	257.0	31.6	35.0	61.7	3.0	1567.7
Bad	8.3	114.0	14.0	35.0	23.7	0.6	232.1
WC	5.0	29.0	3.6	35.0	14.3	0.0	84.0
Z2	25.5	395.0	48.5	35.0	72.9	7.1	4030.1
Z3	16.8	405.0	49.7	25.0	67.2	7.5	1689.0
Wol	22.2	299.3	36.8	35.0	63.5	4.1	3232.6
Woll	22.2	299.3	36.8	35.0	63.5	4.1	3232.6
WollII	22.2	299.3	36.8	35.0	63.5	4.1	3222.4

---

2. Obergeschoß Ost

Z1	17.6	387.0	47.5	30.0	58.7	6.8	1324.0
Bad	8.3	187.0	23.0	25.0	33.2	1.6	324.9
WC	6.3	87.0	10.7	35.0	18.0	0.3	133.8
Z2	30.8	626.0	76.9	35.0	88.0	17.8	6713.2
Z3	16.0	460.0	56.5	20.0	80.0	9.6	3791.8
Wol	24.0	501.7	61.6	35.0	68.5	11.5	3407.8
Woll	24.0	501.7	61.6	35.0	68.5	11.5	3407.8
WollII	24.0	501.7	61.6	35.0	68.5	11.5	3418.7

---

2. Obergeschoß West

Z_	21.6	426.0	52.3	35.0	61.7	8.3	1567.7
Bad	8.3	186.0	22.8	25.0	33.2	1.6	411.9
WC	5.0	71.0	8.7	35.0	14.3	0.2	84.0
Z2	25.5	606.0	74.4	25.0	102.0	16.7	8497.7
Z3	16.8	538.0	66.1	15.0	112.0	13.2	7040.8
Wol	22.2	484.3	59.5	30.0	74.1	10.7	3771.4
Woll	22.2	484.3	59.5	30.0	74.1	10.7	3771.4
WollII	22.2	484.3	59.5	30.0	74.1	10.7	3759.4

---

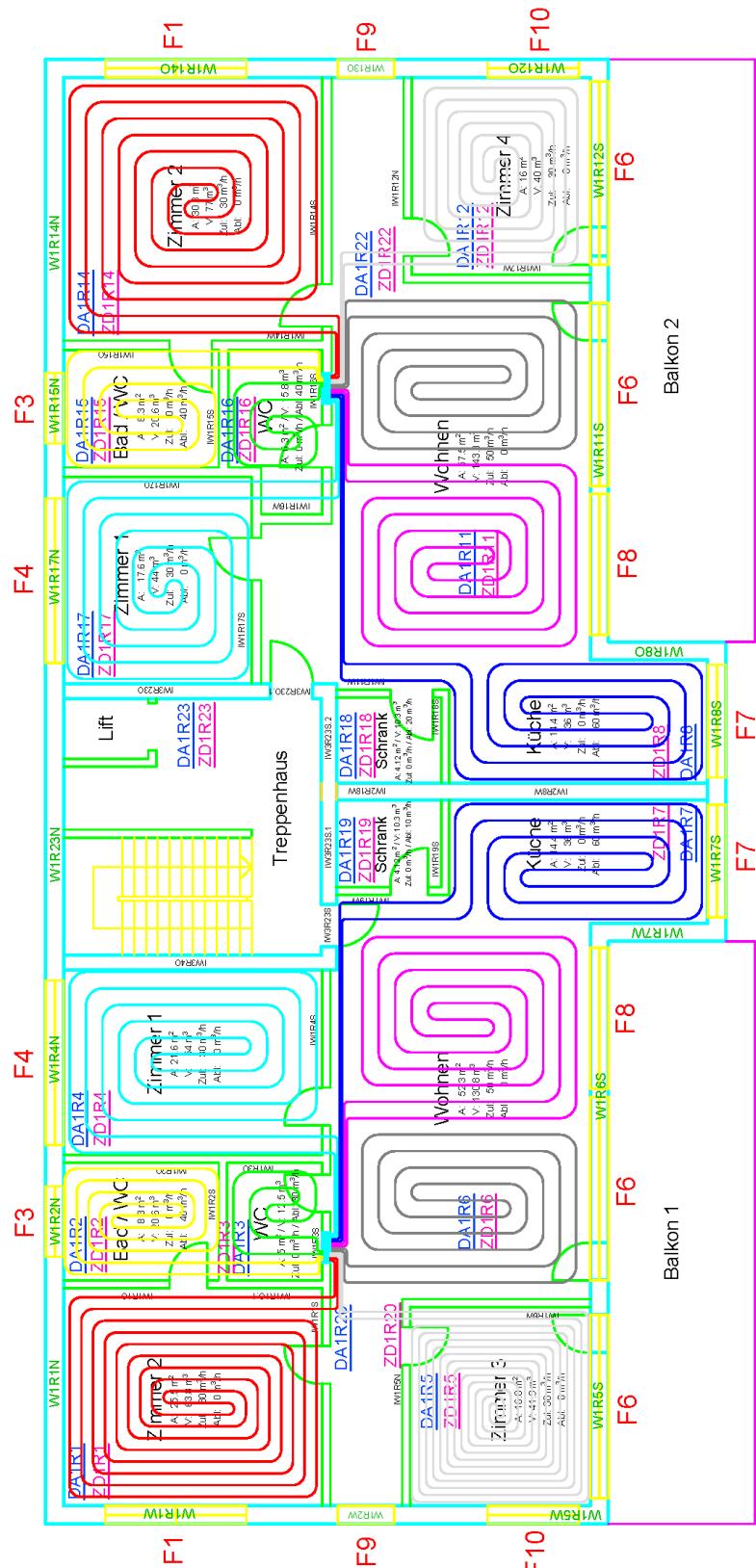


Abbildung 26: Plan der Fußbodenheizung mit Aufteilung auf einzelne Stränge.



## Annex C: Hydraulicschema Versuchsaufbau

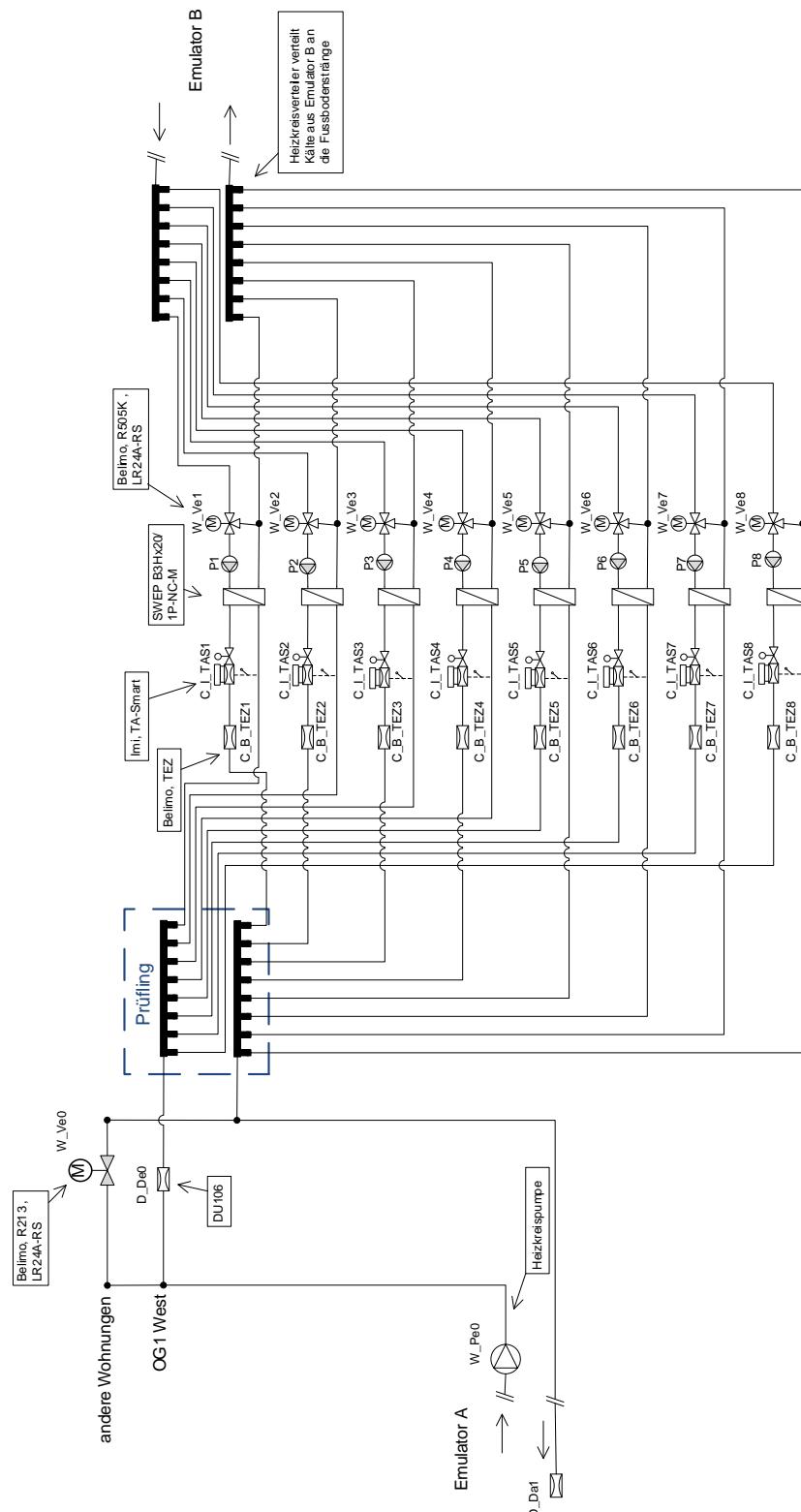


Abbildung 27 Hydraulicschema Versuchsaufbau



## Annex D: Detaillierte Simulationsresultate des Referenzsystems

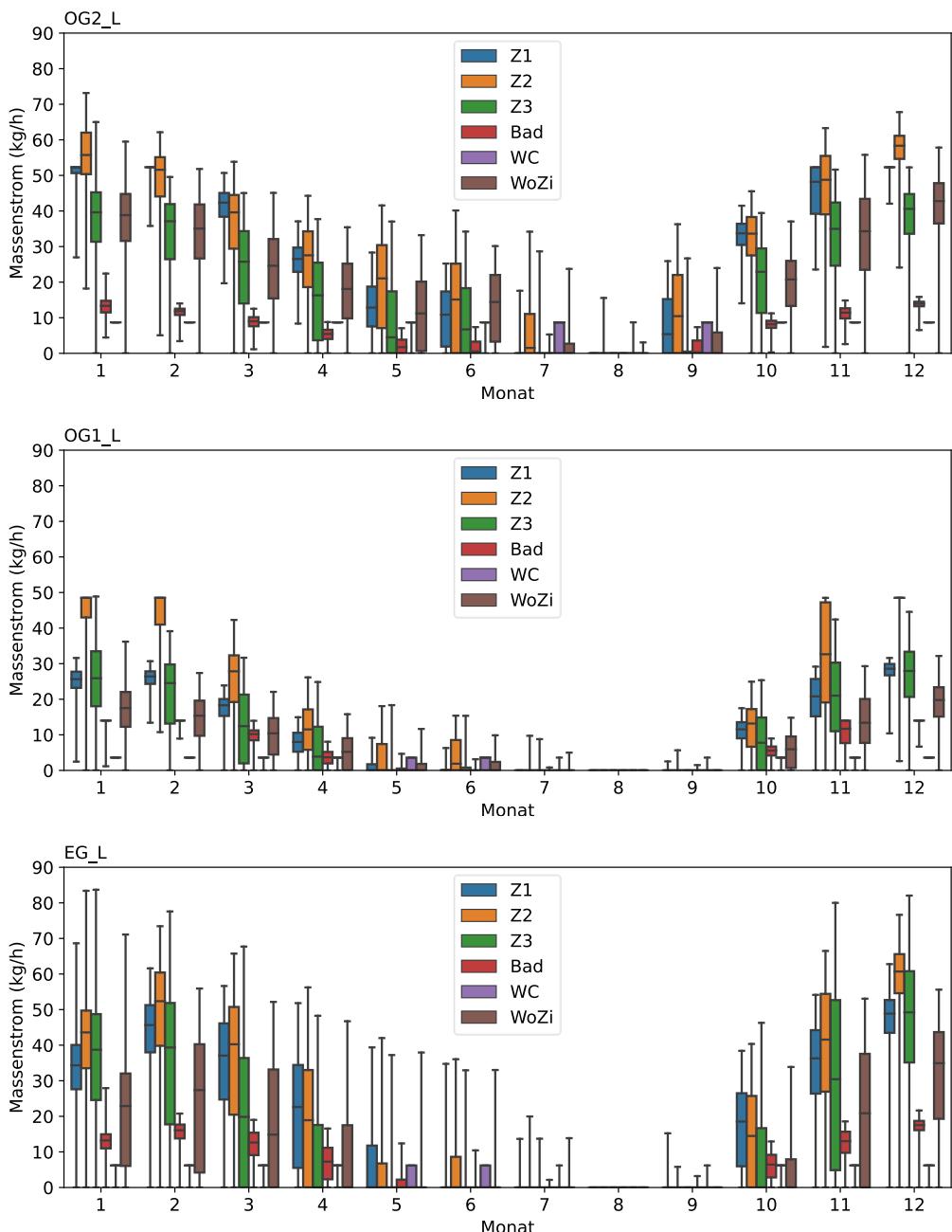


Abbildung 28: Boxplot der Massenströme in den Wohnungen auf der Westseite des Gebäudes, aufgeteilt auf die einzelnen Strängen der FBH im Verlauf des Jahres.

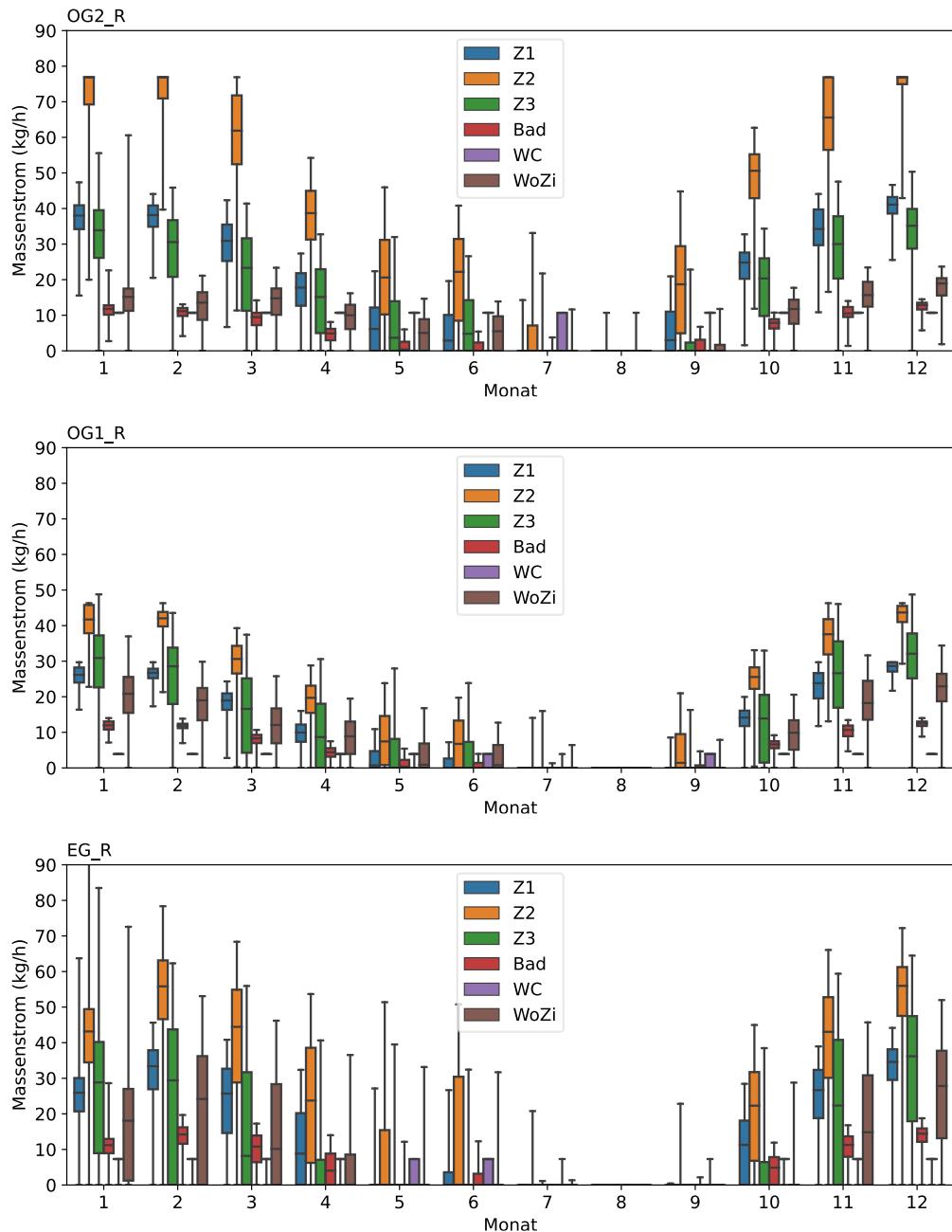


Abbildung 29: Boxplot der Massenströme in den Wohnungen auf der Ostseite des Gebäudes, aufgeteilt auf die einzelnen Strängen der FBH im Verlauf des Jahres.