

Schlussbericht, 31. Oktober 2018

Projekt OpEEr

Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Einzelraumtemperaturregelung



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Igor Mojic, SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

Dr. Michel Haller, SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

Begleitgruppe

Peter Hubacher, FWS

Christoph Gmür, AWEL Zürich

Franz Sprecher, AHB Zürich

Philipp Storrer, Belimo AG

Rita Kobler, BFE

Claudio Menn, BFE

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern

Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Zusammenfassung

In der Schweiz kann laut SIA 384/1 bei Neubauten oder sehr gut sanierten Gebäuden mit Heizungsvorlauftemperaturen unter 30 °C auf eine Einzelraumregelung verzichtet werden. Begründet wird dies mit dem sogenannten „Selbstregeleffekt“, der dazu führt, dass bei Raumtemperaturen über dem Sollwert die Wärmeabgabe an den Raum automatisch verringert wird auf Grund der sinkenden Temperaturdifferenz zwischen Heizmedium und Raum. Laut den Mustervorschriften der Kantone (MuKE n 2014) wird jedoch mindestens eine Referenzraumregelung vorgeschrieben. Einige Kantone haben die Mustervorschriften übernommen, jedoch ist noch unklar bis wann die MuKE n flächendeckend in der ganzen Schweiz umgesetzt werden. Es stellt sich somit die Frage, ob und wieviel Energie mit einer Einzelraumregelung oder einer Referenzraumregelung gegenüber keiner Raumtemperaturregelung eingespart werden kann. Die Untersuchung und der Vergleich dieser drei Varianten der Raumtemperaturregelung leisten einen Beitrag für die Formulierung kantonaler Gesetzgebungen und Normenwerken. Zudem können die Ergebnisse hinsichtlich Komfort, Energieeinsparungen und Wirtschaftlichkeit für Planer und Bauherren hilfreich sein. In dieser Studie wurden die drei Varianten mittels dynamischen Simulationen miteinander verglichen. Als Objekt wurde ein dreistöckiges Referenz-Mehrfamilienhaus in Massivbauweise mit sechs Wohnungen und einem Heizwärmebedarf von 29 kWh/m² modelliert, welches dem aktuellen Baustandard für Neubauten (SIA 380/1:2016) entspricht. Dieses Objekt basiert auf Erfahrungen aus Projekten in welchen reale Gebäude im Detail ausgewertet wurden. Als Bewertungskriterien wurden der Komfort (operative Raumtemperatur), der Endenergieverbrauch des Heizsystems und für die Wirtschaftlichkeit der annuitätische Gewinn beigezogen. Als Heizsystem dient eine Erdsonden-Wärmepumpe mit einem Pufferspeicher. Das Modell entspricht somit einem typischen Neubau welcher für viele Standorte in der Schweiz Gültigkeit hat.

Die Auswertung zeigt, dass im Fall ohne Raumtemperaturregelung der elektrische Endenergieverbrauch für die Wärmepumpe um bis zu 3'551 kWh_{el} (+41%) höher ist als wenn eine Einzelraumregelung installiert ist. Dies ist darauf zurück zu führen, dass ohne Raumtemperaturregelung die operative Raumtemperatur deutlich höher ausfällt als eigentlich vom Nutzer gewollt. Die Simulationen zeigen, dass der Selbstregeleffekt den Wärmeeintrag nicht ausreichend reduziert.

Die Einzelraumregelung schneidet auch besser ab als die Referenzraumregelung, und dies sowohl in Bezug auf Komfort als auch im Endenergieverbrauch. Die Einzelraumregelung kann das gewünschte Temperaturband besser einhalten. Im Fall der Referenzraumregelung werden zum Beispiel in Eckräumen die gewünschten Raumtemperaturen nicht zu jeder Zeit eingehalten. Die Einzelraumregelung weist gegenüber der Referenzraumregelung Einsparungen zwischen 538 kWh_{el} und 1'413 kWh_{el} (-14%) auf. Berücksichtigt man auch die ökonomischen Faktoren, so zeigt sich, dass sich die Einzelraumregelung unter Annahme von Zusatzkosten von etwa CHF 3'300 pro Wohnung und einer Lebensdauer von 15 Jahren nicht amortisiert. Die Amortisationszeit beträgt im Untersuchten Fall mehr als 23 Jahre. Die Referenzraumregelung ist in allen untersuchten Fällen knapp wirtschaftlich im Vergleich zu keiner Raumtemperaturregelung.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass der Wärmebedarf im Zwischengeschoss stark davon abhängt, mit welchen Solltemperaturen die Stockwerke darunter und darüber beheizt werden. Falls die Wohnungen oberhalb und unterhalb deutlich höher Raumtemperaturen aufweisen (+3 K), kann sich der Anteil am Gesamtwärmebedarf im Zwischengeschoss von 20% auf 1% reduzieren und das unabhängig von der Wahl der Raumregelung. Auch führt dies zu ungewollt hohen Temperaturen im Zwischengeschoss, falls darüber und darunter hohe Raumsolltemperaturen eingestellt sind. Dies kann dazu führen, dass die Bewohner häufiger Fensterlüften um Übertemperaturen zu verhindern, was wiederum den Heizwärmeverbrauch des gesamten Gebäudes erhöht. Hier empfehlen wir weitere Untersuchungen, da möglicherweise bei sehr gut gedämmten Häusern eine bessere Dämmung der Zwischendecke sinnvoll sein könnte. Eine gesetzliche Vorgabe an den maximalen U-Wert unter der Fussbodenheizung zur angrenzenden Wohnung ($0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, vgl. MuKE n 2014 Art. 1.42) gibt es in den meisten Kantonen nur, wenn der Einbau der Geräte für die „Verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung (VHKA)“ verlangt wird. Dabei ist zu beachten, dass nach der MuKE n 2014 die Abrechnung der Heizkosten bei Neubauten nicht mehr gefordert wird und somit auch der maximale U-Wert zwischen den Geschossen keinen energetischen Anforderungen mehr unterliegt.

Summary

In Switzerland, the standard SIA 384/1 does not require individual room temperature control for new buildings or very well refurbished buildings with space heat supply temperatures below $30 \text{ }^\circ\text{C}$. This is justified by the so-called "self-control effect", which means that at room temperatures above the set point the heat input into the room is reduced due to the decreasing temperature difference between the hydronic heating system and the room. According to the new regulations of the cantons (MuKE n 2014), at least a reference room temperature control is prescribed. However, it is still unclear whether and when the individual cantons will adopt this regulation. For this reason, this study compared the three most common variants for room temperature control using dynamic simulations (reference room control, individual room control and no room temperature control). A three-stories reference apartment building in massive construction with six apartments was modelled, based on experience from projects in which real buildings were evaluated in detail. The building has a design heating demand of 29 kWh/m^2 . The building thus corresponds to the current building standard in Switzerland. Evaluation criteria were comfort (operative room temperature), final energy consumption of the heating system and for the economic analysis the annuity profit. A geothermal heat pump with a buffer tank was assumed for the heat generation.

The evaluation shows that in the case without room control the final electricity consumption of the heat pump is up to $3'551 \text{ kWh}_{\text{el}}$ (+41%) higher than if individual room control is installed. This is due to the fact that without room temperature control, the operative room temperature is significantly higher than the user actually desires. The simulations show that the self-control effect cannot sufficiently reduce the heat input into the room.

Individual room control also performs better than reference room control in terms of comfort and final energy consumption. The individual room control can better maintain the desired temperature band. In the case of the reference room control, for example, the desired room temperatures are not maintained at all times in corner rooms. The individual room control shows savings between 538 kWh_{el} and 1'413 kWh_{el} (-14%) compared to the reference room control. If economic factors are also taken into account, it can be seen that the individual room control system does not amortize over the assumed service lifetime of 15 years, if additional costs of 3'300 CHF per apartment are assumed. The reference room control is in all examined cases just economical.

A further finding from the project is that the heat requirement in the floor between two other floors depends strongly on the temperatures with which the floors below and above are heated. Under certain circumstances, the ratio of the total heat requirement in the floor in the middle can be reduced from 20% to 3% and that regardless of the room control variant. This also leads to unintentionally high temperatures in the floor in between if high room set point temperatures are set above and below. This can result in residents ventilating by opening the windows more frequently to prevent excessive temperatures, which in turn increases the heating consumption of the entire building. We recommend further investigations concerning this subject, since a reduction of the legal maximum U-value (0.7 W/m²K) for floors could be advantageous for very well insulated houses.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Summary	4
1 Einleitung	7
2 Grundlagen	7
3 Methodik	9
3.1 Gebäudemodell.....	9
3.2 Interne Lasten	12
3.3 Sonnenschutz.....	12
3.4 Heizung	12
3.5 Lüftung.....	15
3.6 Wärmeabgabesystem	17
3.7 Raumtemperaturregelung	18
3.8 Wirtschaftlichkeit.....	19
4 Resultate und Diskussion	21
4.1 Vergleich der drei Varianten zur Raumtemperaturregelung.....	21
4.2 Individuelle Raumtemperaturabsenkung	31
4.3 Der Wärmefluss zwischen den Wohnungen.....	39
5 Schlussfolgerung	42
6 Empfehlungen	46
7 Ausblick	47
8 Fact Sheet in Bezug auf MFH	48
9 Literaturverzeichnis	49
Anhang A: Referenzgebäude MFH	51
Anhang B: Weiterführende Resultate zu Kapitel 4.1.1	54

1 Einleitung

In der Schweiz kann laut SIA 384/1 [1] bei Neubauten oder sehr gut sanierten Gebäuden mit Heizungsvorlauftemperaturen unter 30 °C auf eine Einzelraumregelung verzichtet werden. Begründet wird dies mit dem sogenannten „Selbstregeleffekt“ [2], der dazu führt, dass bei Raumtemperaturen über dem Sollwert die Wärmeabgabe an den Raum automatisch verringert wird auf Grund der sinkenden Temperaturdifferenz zwischen Heizmedium und Raum. Mit den MuKE 2014 [3] wird jedoch mindestens eine Referenzraumregelung pro Wohn- oder Nutzeinheit verlangt. Einige Kantone haben die Mustervorschriften übernommen, jedoch ist noch unklar bis wann die MuKE flächendeckend in der ganzen Schweiz umgesetzt werden. Es ist somit nicht auszuschliessen, dass in Zukunft in einzelnen Kantonen weiterhin auf eine Einzelraum- oder Referenzraumregelung bei Neubauten mit Vorlauftemperaturen von 30 °C oder tiefer verzichtet werden darf.

Der vorliegenden Studie gehen zwei Untersuchungen des SPF voraus, welche sich mit dem Thema Einzelraumregelung und Selbstregeleffekt befasst haben. In der ersten Arbeit „Einfluss von raumbasierten Regelungen auf den Raumwärmebedarf eines Einfamilienhauses mit Niedertemperatur-Verteilsystem“ [2] wurde neben den energetischen Fragestellungen vor allem der sogenannte Selbstregeleffekt an sich und der Einfluss der Einzelraumregelung auf das Heizungssystem untersucht. Die zweite Studie mit dem Titel „Einfluss der Einzelraumregelung auf den Raumwärmebedarf von Niedrigenergiehäusern mit hohem Verglasungsanteil“ [4] baut auf der ersten Arbeit auf, wurde jedoch um zusätzliche Aspekte wie Verschattung, Fensteranteil, Bauweise und Referenzraumregelung ergänzt. In beiden Untersuchungen lag der Fokus auf Einfamilienhäusern. **Die vorliegende Studie ergänzt die vorangehenden Arbeiten, indem der Einfluss der Raumtemperaturregelung für Mehrfamilienhäuser untersucht wird.** Diese Studie wurde mit einer Reihe von Fachexperten begleitet und somit breit abgesichert.

2 Grundlagen

Nachfolgend wird der „Selbstregeleffekt“ genauer beschrieben und die Resultate und Erkenntnisse von vorangehenden Studien zusammengefasst.

Bei Niedrigenergiehäusern (z.B.: Minergie) ist die Systemheiztemperatur sehr tief (23 °C – 29 °C) und damit nahe an der Raumtemperatur. Sobald nun die Raumtemperatur durch äussere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung angehoben wird, sinkt die Temperaturdifferenz zwischen der Bodenoberfläche und dem Raum, bzw. den übrigen Raumbooberflächen, was zur Folge hat, dass weniger Wärme vom Boden an den Raum abgegeben wird. Damit wird ein Regeleffekt ohne technische Massnahmen erreicht (Selbstregeleffekt).

Der sogenannte „Selbstregeleffekt“ wurde in mehreren Studien wie STASCH [5] und FAWA [6] untersucht. Diese Untersuchungen schienen den Sachverhalt, dass bei tiefen Vorlauftemperaturen keine Raumregelung nötig ist, zu belegen. Simulationsanalysen, welche im IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 [7] durchgeführt wurden, kamen jedoch zum Ergebnis, dass Thermostatventile den

Raumwärmebedarf, und in Folge davon den elektrischen Verbrauch von Wärmepumpen, auch bei niedrigen Vorlauftemperaturen der Heizkreisverteilung substantiell verringern können. Die unterschiedlichen Schlussfolgerungen sind einerseits auf die unterschiedlichen Simulationsmodelle zurück zu führen und andererseits hat sich der Stand der Technik über die Jahre stark verändert. Heute sind drehzahlgeregelte Wärmepumpen im kleinen bis mittleren Leistungsbereich Standard. Dies führt dazu, dass auch alle Heizkreise mit Thermostatventilen ausgerüstet werden können, ohne dass es zu häufigem Takten der Wärmepumpe kommt. Zudem werden heute effiziente und regelbare Heizkreispumpen verwendet und zunehmend auch Komfortlüftungen.

Die zwei am häufigsten verwendeten Raumtemperaturregelungsarten sind:

- **Einzelraumregelung:** In jedem Raum wird ein Thermostat installiert welcher bei einer Unterschreitung der Solltemperatur im Raum das entsprechende Ventil im Heizkreisverteiler öffnet.
- **Referenzraumregelung:** Es wird jeweils ein Raum im Haus oder in der Wohnung als Referenz für die Temperaturmessung gewählt. Sobald in diesem Raum die Solltemperatur unterschritten wird, werden alle Heizkreise mit Wärme versorgt, auch wenn möglicherweise einzelne Räume noch warm genug sind.

Detailliertere Informationen zu den Regelungsvarianten sind im Kapitel 3.7 beschrieben.

In zwei Studien des SPF [2], [4] konnte aufgezeigt werden, dass bei Einfamilienhäusern (EFH) mit einer Einzelraumregelung, trotz tiefen Vorlauftemperaturen im Heizkreis, elektrische Einsparungen von bis zu 815 kWh (-33%) erreicht werden können. Ein weiterer Vorteil einer Einzelraumregelung ist, dass Räume die nicht genutzt werden mit einer tieferen Einstellung der Solltemperatur (z.B.: 16°C) betrieben werden können. Dies führt schlussendlich zu Energieeinsparungen für den Fall, dass das Wohngebäude nur noch mit einer reduzierten Anzahl Bewohner belegt ist, zum Beispiel wenn in einer Familie die Kinder ausgezogen sind. Die Simulationen zeigen, dass wenn zwei Räume im untersuchten EFH abgesenkt werden bis zu 464 kWh (-21%) elektrische Energie einer Wärmepumpenheizung eingespart werden kann.

Bei der Verwendung einer Referenzraumregelung werden geringere Einsparungen erreicht als mit einer Einzelraumregelung. Ebenfalls wichtig ist die Tatsache, dass mit einer Referenzraumregelung der Komfort nicht zu jederzeit in jedem Raum gleich gut eingehalten werden kann wie bei der Einzelraumregelung. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeverluste und Gewinne kann es sein, dass der Referenzraum keinen Wärmebedarf aufweist, gleichzeitig jedoch Zonen wie das Badezimmer oder Eckräume im zweiten Stockwerk noch nicht auf Solltemperatur sind. Die richtige Wahl des Referenzraumes ist anspruchsvoll und ist von Objekt zu Objekt unterschiedlich. Auf Grund der Resultate der beiden Studien empfehlen die Autoren auch bei gut gedämmten **Einfamilienhäusern** eine Einzelraumregelung.

3 Methodik

Für die vorliegende Studie wurde das Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE Version 4.8 verwendet. Es wurde ein Jahr mit dynamischen Zeitschritten (15 – 60 Minuten) simuliert. Das Gebäude ist ein Referenzgebäude welches auf den Erfahrungen und Resultaten aus dem BFE Projekt ImmoGap [8] basiert. Im Projekt ImmoGap wurden 65 Mehrfamilienhäuser (MFH) zum Thema „Performance Gap“ untersucht, dabei handelt es sich vorwiegend um Objekte mit Baujahr 2009 bis 2014. Für die Simulation wurde die Klimastation Zürich SMA verwendet.

Die weiteren Annahmen und Simulationsparameter werden in den folgenden spezifischen Kapiteln genauer beschrieben.

3.1 Gebäudemodell

Das Gebäudemodell besteht aus drei Wohngeschossen und einem Kellergeschoss. Mit geringen Abweichungen entspricht der Grundriss des Gebäudes einem der Objekte aus ImmoGap in Massivbauweise. Das Gebäude weist eine Energiebezugsfläche (EBF) von 1205 m², einer Gebäudehüllzahl von 1.3 und einem Fensteranteil von 25.1% der EBF. Diese Kennzahlen entsprechen im Schnitt den 65 MFH im Projekt ImmoGap. Der Heizwärmebedarf beträgt nach SIA 380/1:2009 [6] (berechnet mit Lesosai) 104.8 MJ/m²a (29.1 kWh/m²a).

In der Abbildung 1 ist die Zonenaufteilung aufgeführt, dabei sind alle bewohnten Geschosse identisch. In Abbildung 3 ist das Gebäude in unterschiedlichen Ansichten dargestellt. In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Informationen zur Gebäudehülle zusammengefasst, detaillierte Informationen sind im Schlussbericht von ImmoGap [8] beschrieben. Das Gebäude wird nicht durch Bäume oder andere Objekte verschattet.

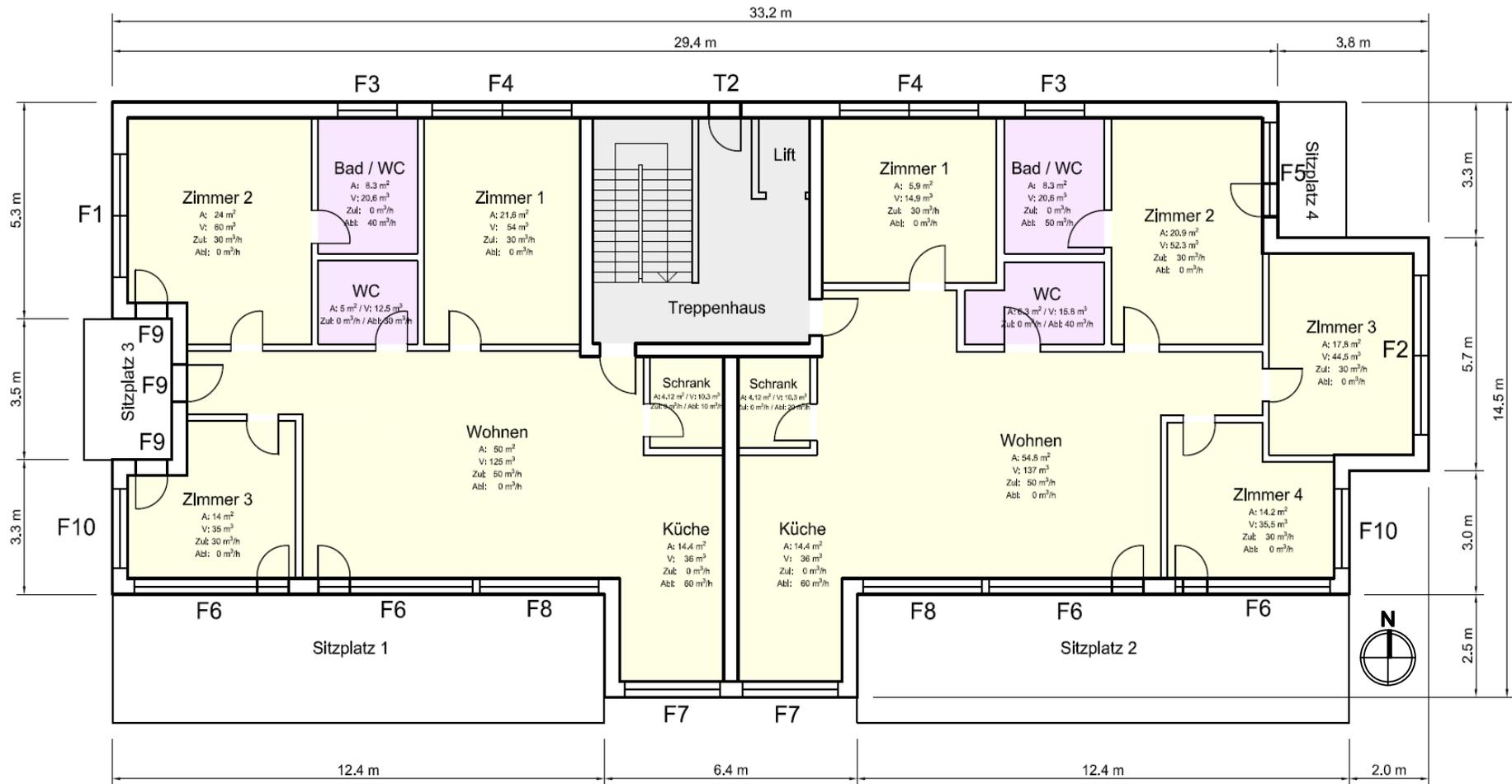


Abbildung 1: Grundriss und Zonenaufteilung des Erdgeschosses und der beiden Obergeschosse.

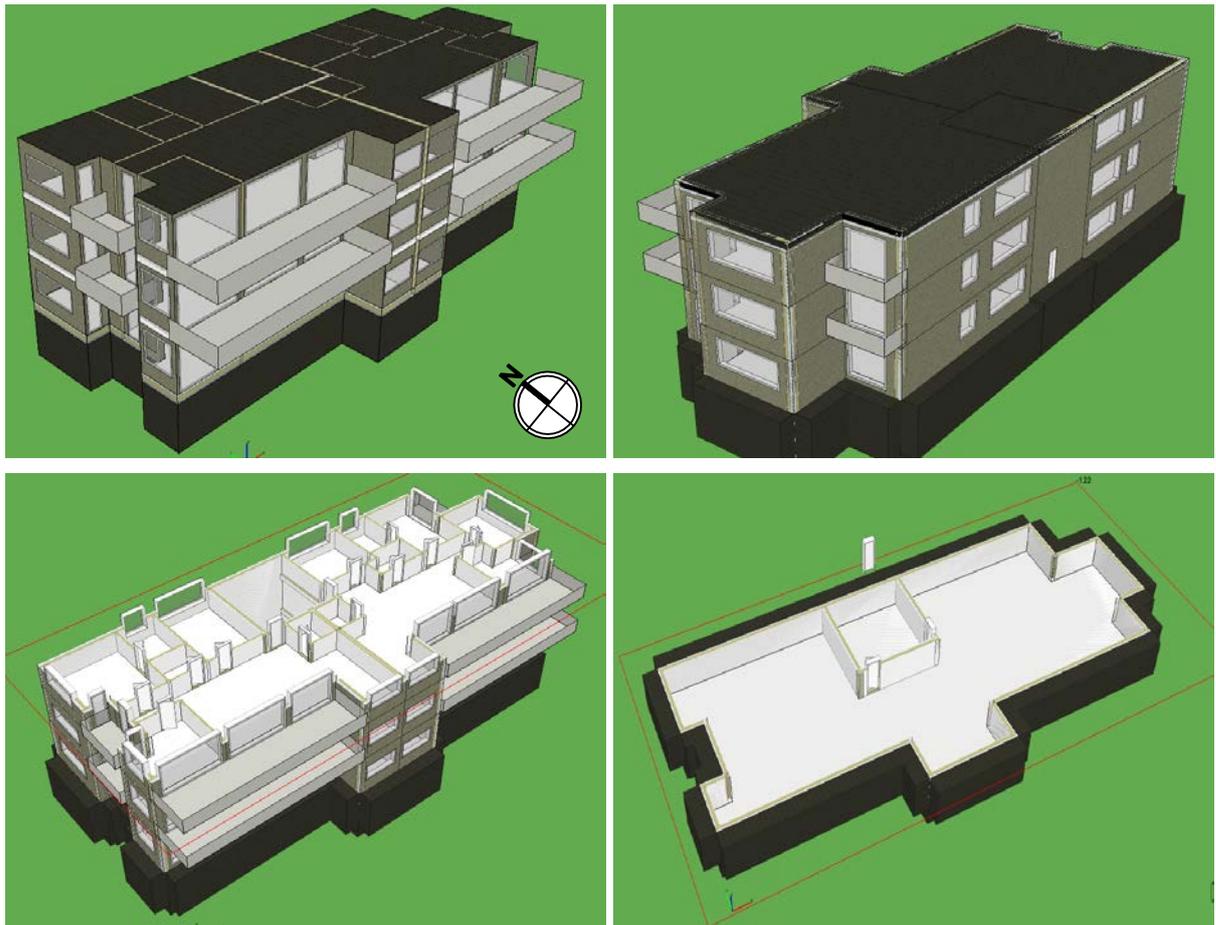


Abbildung 2 Modellansichten in IDA ICE: Süd- und Westfassade (oben links), Nord- und Ostfassade (oben rechts), Schnitt durch 2. OG mit Raumeinteilung (unten links) sowie Schnitt durch Kellergeschoss (unten rechts)

Tabelle 1 Zusammenfassung der wichtigsten Gebäudehüllbauteile

Bauteil	U-Wert [W/m^2K]	Dicke Aufbau [m]
Aussenwand gegen Aussenluft	0.18	0.385
Innenwand gegen unbeheizt	0.33	0.325
Boden gegen unbeheizt	0.20	0.470
Dach	0.18	0.412
Zwischendecke	0.64	0.350
Fenster	$U_F: 0.85 - 1.0$	g-Wert: 0.45

3.2 Interne Lasten

Die internen Lasten (Anwesenheit, Abwärme von Elektrogeräten, etc.) entsprechen den Vorgaben des SIA Merkblattes 2024 [10]. Nachfolgende Standardnutzungen wurden in den Simulationen für die jeweiligen Zonen verwendet:

- Treppenhaus: 2.1 Verkehrsfläche
- Zimmer: 1.1 Wohnen MFH
- WC/Dusche: 12.6 WC, Bad, Dusche
- Wohnzimmer/Küche: 1.1 Wohnen MFH

3.3 Sonnenschutz

Als Sonnenschutz wurden aussenliegende Lamellenstoren eingesetzt. Dabei wird der g-Wert der Fenster von 0.45 auf 0.06 reduziert. Die Regelung der Verschattung richtet sich nach der SIA 180 [8] welche auf Grund der Erfahrung aus dem Projekt ImmoGap die Realität besser abbildet als die Verschattung der SIA 380/1 [6].

Die verwendete **Standardverschattung** wurde wie folgt geregelt: Sobald die Einstrahlung auf das Fenster 200 W/m^2 übersteigt und die Raumtemperatur höher als 20.5 °C ist, wird die Verschattung aktiviert (stufenlos). Sobald eine der beiden Bedingungen nicht mehr erfüllt ist, wird die Verschattung deaktiviert. Im Kapitel 4.1.3 wurde eine weitere Verschattungsregelung verwendet um den Einfluss der Verschattung mit einzubeziehen. Es wurde eine von der **Jahreszeit abhängig** Regelung verwendet:

- Vom Oktober bis April: Verschattung ab 24 °C Innentemperatur und 200 W/m^2 Einstrahlung
- Restliche Zeit: Standardverschattung

Mit dieser Regelung soll Rechnung getragen werden, dass die Bewohner im Winter wahrscheinlich eher weniger stark verschatten wie in der Übergangszeit und im Sommer.

3.4 Heizung

Die Wahl des Heizungssystems und deren Regelung wurde in Absprache mit der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) getroffen. In dieser Studie wurde eine Sole-Wasser Wärmepumpe mit einer Leistung von 30 kW simuliert. Die Leistung ergibt sich aus der Norm-Heizlast nach SIA 384.201 [9] und den Berechnungsgrundlagen für die Dimensionierung von Wärmepumpen nach STASCH [5]. Das vereinfachte Hydraulikschema der Heizung ist in Abbildung 4 dargestellt. Es wurde darauf verzichtet die Warmwasserbereitstellung (WW) in der Simulation zu integrieren, da diese keinen Einfluss auf die Fragestellung bezüglich der Einzelraumregelung hat. Jedoch kann die WW-Bereitstellung einen Einfluss auf die Dimensionierung der Wärmepumpe haben. Laut SIA 385/2 [11] muss bei einer Kombination von Heizung und WW-Bereitstellung (gleicher Wärmeerzeuger) keine zusätzliche Leistung addiert werden, wenn die Raumheizung während der Wassererwärmung unterbrochen werden kann. Dies ist in diesem Fall gegeben, da

eine Bodenheizung mit hoher thermischer Masse und ein Pufferspeicher eingesetzt werden.

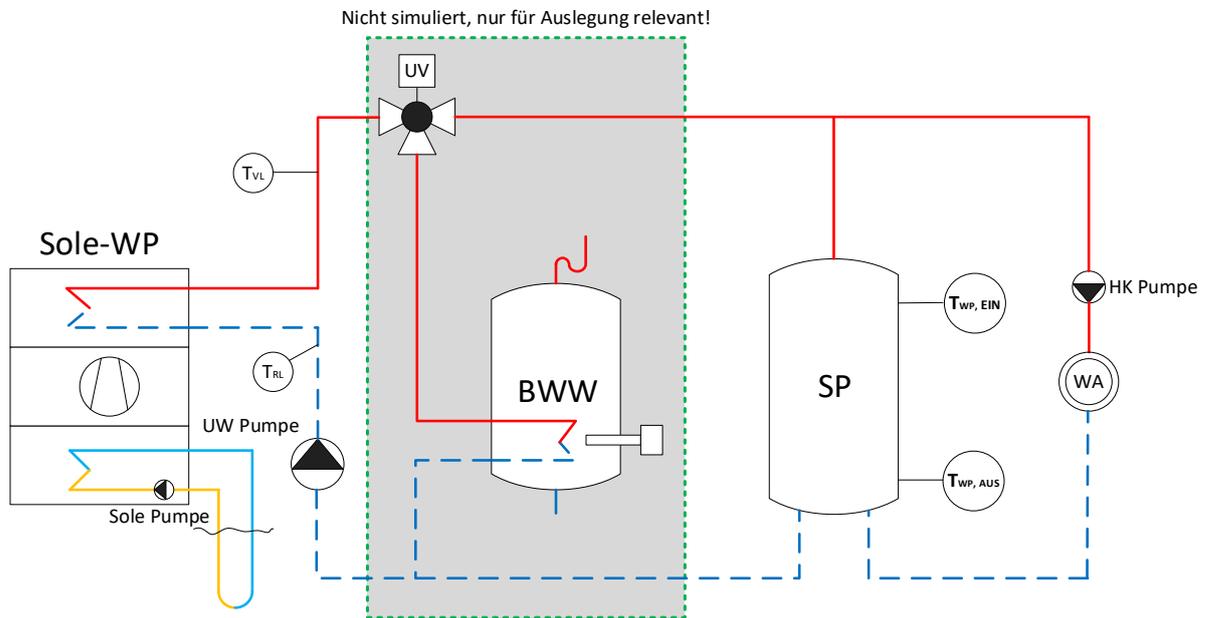


Abbildung 3: Vereinfachtes Hydraulikschemata der simulierten Wärmeerzeugung.

Tabelle 2: Zusammenfassung der wichtigsten Heizungsparameter.

Parameter		Einheit
WP Leistung (B0/W35)	30	kW
WP COP (B0/W35)	4.0	-
Volumen Pufferspeicher	1.0	m ³
Massenstrom Heizkreispumpe	3'247	kg/h
Massenstrom Solepumpe	2'160	kg/h
Massenstrom Umwälzpumpe	3'960	kg/h
Erdsonden 2 Stück à	190	m

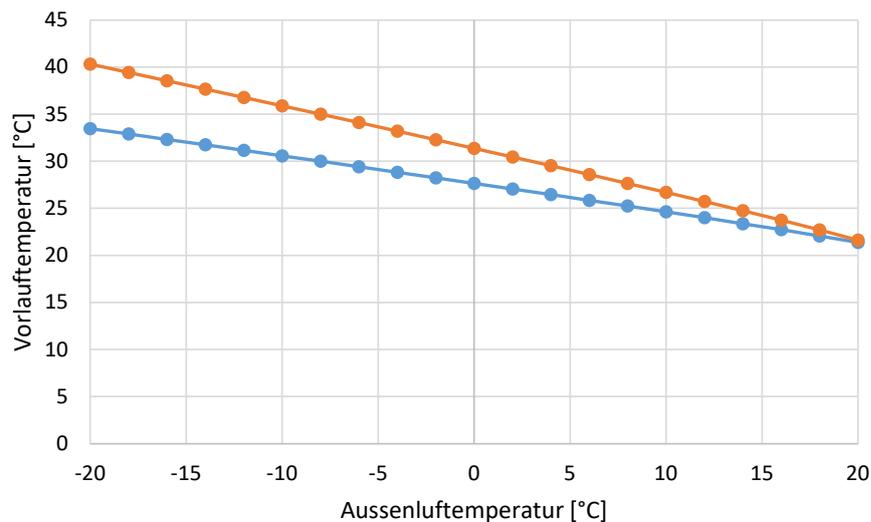


Abbildung 4: Darstellung der beiden Heizkurven die im Projekt verwendet wurden ($T_{VI} = 30^{\circ}\text{C}$ und $T_{Vl} = 35^{\circ}\text{C}$).

Für die Pumpen wurde das Standard Pumpenmodell von IDA ICE verwendet. Dieses hat einen fixen Pumpenwirkungsgrad von 0.5 und berechnet den elektrischen Strom abhängig vom Massenstrom nach folgender vereinfachten Formel:

$$P_{el} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot \eta_{\text{Pumpe}}}, \quad \text{mit } \Delta p = 40'000 \text{ Pa}, \quad \rho = 995.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad \eta_{\text{Pumpe}} = 0.5$$

Es wird berücksichtigt, dass bei schliessenden Thermostatventilen sich der Massenstrom im Heizkreis reduziert und damit auch die elektrische Leistung der Pumpe (entsprechend einer konstanten Druckdifferenz). Der Effekt der Heizkreispumpe ist jedoch gering, da der Stromverbrauch mit 1-2% vom Wärmepumpenverbrauch klein ist.

Die Erdsonde wurde in den Simulationen vereinfacht simuliert, da der Schwerpunkt der Studie nicht auf der Quelle sondern auf der Senkenseite der Wärmepumpe liegt. Man kann davon ausgehen, dass die Wahl der Raumtemperaturregelung keinen massgeblichen Einfluss auf die Quelle der Wärmepumpe hat. Es wurde das Standard Einsonden-Modell von IDA ICE verwendet.

Die Heizgrenze wurde mit 17°C so gewählt, dass diese eher der in der Praxis gemessenen Heizgrenze bei Mehrfamilienhäusern entspricht [8]. Die theoretische Heizgrenze, ermittelt über die Energiesignatur, würde einem Wert von 12°C entsprechen (siehe Abbildung 5). Die Heizkreispumpe wird eingeschaltet sobald die Aussentemperatur gemittelt über die letzten 24 Stunden 16.5°C unterschreitet, und sie wird wieder ausgeschaltet, wenn der Aussenluftmittelwert (24h) oder der aktuelle Wert 17.5°C überschreitet.

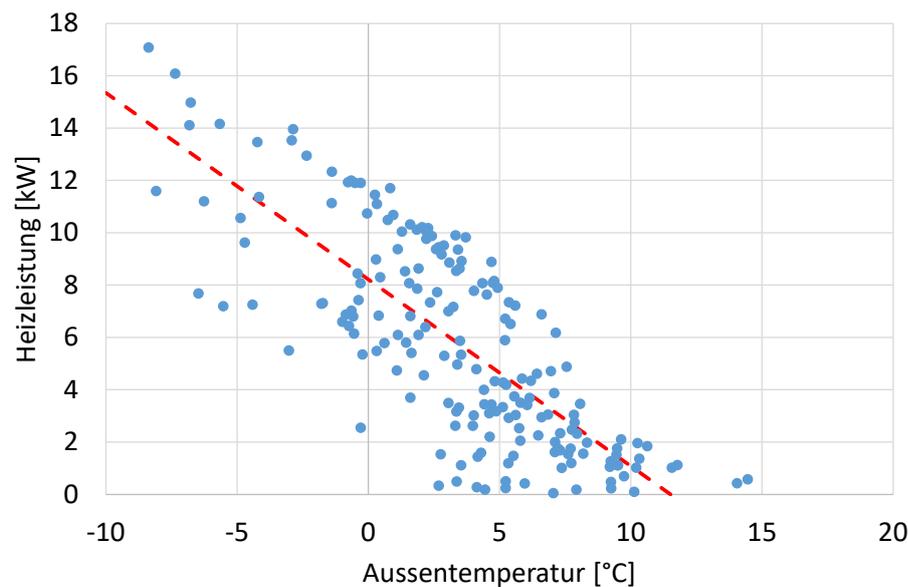


Abbildung 5: Leistungskennlinie basierend auf Tagesmittelwerten des Referenzgebäudes mit „idealem Benutzerverhalten“ nach SIA 380/1.

3.5 Lüftung

Für die Simulationen wurde angenommen, dass das Gebäude eine Komfortlüftung aufweist mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 80%. Eine Feuchterückgewinnung, Lufterwärmung oder Kühlung wurde nicht mitberücksichtigt. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Zu- und Abluftmengen für die einzelnen Zonen zusammengefasst. Diese sind für alle Stockwerke identisch. Die Volumenströme wurden nach SIA Merkblatt 2023 [14] ausgelegt und anschliessend um den Faktor 2 reduziert. Damit wird dem Umstand¹ Rechnung getragen, dass in den meisten Wohnungen bei einem dreistufigen Lüftungssystem dieses auf der mittleren Stufe betrieben wird.

Um ein Überströmen zwischen den Zonen zu garantieren wurde eine Luftdurchlässigkeitsfläche in den Türen von 0.01 m² angenommen, was einem Spalt von ca. 1 cm entspricht (zwischen Boden und Tür). Grundsätzlich werden die Türen, wenn nicht explizit im Kapitel vermerkt, als offen betrachtet in den Simulationen.

Auf Grund der Resultate im Projekt ImmoGap [8] kann davon ausgegangen werden, dass in der Nacht pro Wohnung ein Kippfenster offen steht in der Übergangszeit (1. April bis 30. September – von 20.00 Uhr bis 07.00 Uhr). In den Simulationen wurde angenommen, dass jeweils im Zimmer 1 (Ost- und Westwohnung) 10% der Fensterfläche geöffnet ist, was in etwa einem gekippten Fenster pro Wohnung entspricht.

¹ Auswertung von Messdaten von einem realen MFH mit 24 Wohnungen

Tabelle 3: Zuluft- und Abluftmengen im Auslegungsfall Wohnung West.

Zone	Zuluft m³/h	Abluft m³/h
Zimmer 1	30	0
Bad/WC	0	40
WC	0	30
Zimmer 2	30	0
Zimmer 3	30	0
Wohnung / Küche	50	70
Total:	140	140

Tabelle 4: Zuluft- und Abluftmengen im Auslegungsfall Wohnung Ost.

Zone	Zuluft m³/h	Abluft m³/h
Zimmer 1	30	0
Bad/WC	0	50
WC	0	40
Zimmer 2	30	0
Zimmer 3	30	0
Zimmer 4	30	0
Wohnung / Küche	50	80
Total:	170	170

3.6 Wärmeabgabesystem

Für die vorliegende Studie wurde das Standardmodell der Fussbodenheizung in IDA ICE verwendet. Dieses beruht auf der stationären Form der Widerstandsmethode des Standards EN15377-1 [15]. In Abbildung 6 ist der Bodenaufbau für alle Geschosse dargestellt.

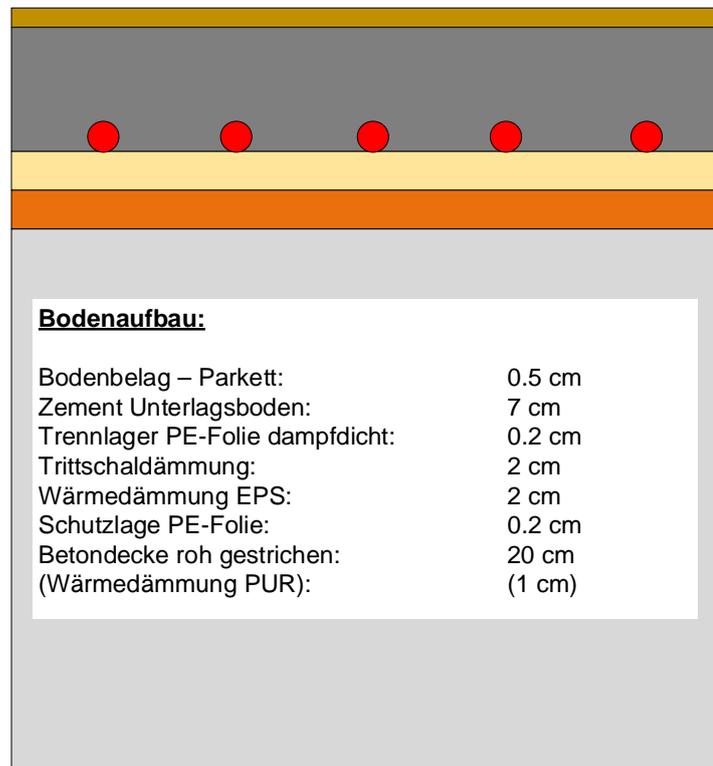


Abbildung 6: Bodenaufbau im Schnitt mit Position der Heizungsrohre. In Klammern zusätzliche Dämmung im EG (Boden gegen unbeheizt).

Die Bodenheizung wurde auf Grund einer Berechnung nach SIA 384.201 [9] ausgelegt und wird im Standardfall mit einer Vorlauftemperatur von 30 °C und einer Rücklauftemperatur von 24 °C im Auslegungsfall betrieben. Die benötigte Wärmeleistung pro Zone im Auslegungsfall ist im Anhang A in Abbildung 28 bis Abbildung 30 aufgeführt. Die Heizlastberechnung wurde in Lesosai Version 2018 durchgeführt.

3.7 Raumtemperaturregelung

Im Fall der Einzelraumregelung wurden Thermostatventile mit einem On/Off – Verhalten und einer Hysterese von einem Kelvin verwendet. Laut Herstellerangaben² sind diese Regelungseinheiten die Meistverbauten im Mehrfamilienhausbereich. Die Wahl der Hysterese hat einen Einfluss auf das Heizungssystem (Volumenstromprofil) sowie auf den Komfort. Eine höhere Hysterese führt dazu, dass die Abweichung zum Sollwert grösser wird und damit die Temperaturen im Raum stärker schwanken (siehe Abbildung 7). Diese Zusammenhänge sind in der Arbeit von Mojic et al. [4] genauer erläutert.

Im Fall ohne Raumtemperaturregelung werden alle Heizkreise im Gebäude während der Heizsaison immer mit vollem Volumenstrom durchströmt. Die Heizsaison wird über die Heizgrenze und den gleitenden 24 Stundenmittelwert der Aussenlufttemperatur bestimmt (siehe Kapitel 3.4).

Der Unterschied zwischen der Einzelraumregelung und der Referenzraumregelung besteht darin, dass die Temperaturmessung und Wärmeabgaberegulierung nicht mehr für jeden einzelnen Raum installiert sind. Im Fall der Referenzraumregelung werden alle Räume in einer Wohnung in Abhängigkeit eines Referenzraums geregelt. Häufig wird als Referenzraum das Wohnzimmer gewählt und dort die Temperatur erfasst. In diesem Projekt werden für die Referenzraumregelung und für die Einzelraumregelung die gleichen Regelungsparameter (Regelverhalten, Hysterese etc.) verwendet.

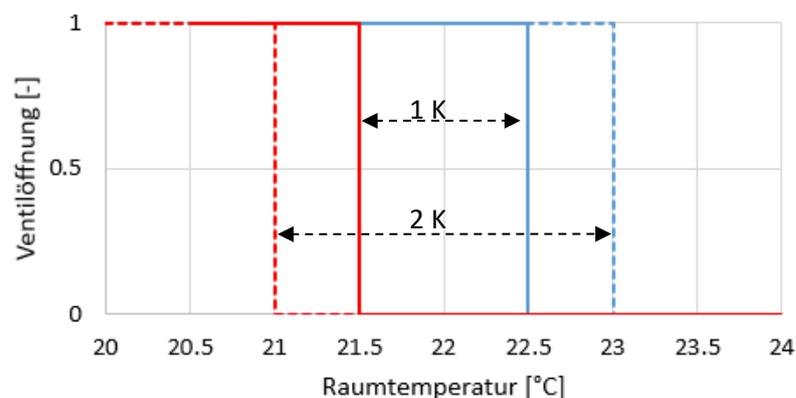


Abbildung 7: Regelverhalten des On/Off-Thermostatventiles mit unterschiedlichen Hysteresen.

² Information von Feller AG, 23. Mai 2016.

3.8 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Regelungsvarianten wird mit der Annuitätenmethode bewertet. Diese baut auf unterschiedlichen Annahmen und Berechnungen [16] auf, welche nachfolgend erläutert werden. Um eine Energiesparmassnahme zu beurteilen wird der annuitätische Gewinn berechnet. Dieser wird aus der Differenz zwischen annuitätischen Erlösen, respektive Einsparungen, und annuitätischen Kosten gebildet.

Die annuitätischen Kosten der Energiesparmassnahme werden mit folgender Formel berechnet:

$$K = a \cdot I + Z$$

mit:

K = annuitätische Kosten nach der energiesparenden Massnahme

I = Mehrkosten für die energiesparende Massnahme

Z = jährliche Kosten für Wartung und Ersatz

$$a = \text{Annuitätenfaktor} = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

i = Kalkulationszinssatz

n = Nutzungsdauer

Der annuitätische Erlös wird mit nachfolgender Formel berechnet:

$$E = p \cdot (E_0 - E_s)$$

mit:

E = annuitätische Erlös (Energieeinsparung durch die Massnahme)

p = mittlere zukünftiger Preis der Energieeinheit

E_0 = jährlicher Energieverbrauch ohne Massnahme

E_s = jährlicher Energieverbrauch nach Durchführung der Massnahme

Eine Energiesparmassnahme ist wirtschaftlich, wenn die annuitätischen Einsparungen an Energiekosten grösser sind als die annuitätischen Kosten. Der annuitätische Gewinn G muss grösser sein als Null. Berechnet wird dieser mit nachfolgender Formel:

$$G = E - K = p \cdot (E_0 - E_s) - (a \cdot I + Z)$$

Die hier gewählten Beurteilungskriterien eignen sich insbesondere dann zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit einer Investition, wenn die Energieeinsparungen für den Investor tatsächlich auch als Einnahmen

ausgewiesen werden können. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn der Eigentümer das Wohnobjekt selber nutzt. Bei Mietwohnungen kommt der Nutzen der Energieeinsparungen in Form einer Reduktion der Heizkosten primär dem Mieter zugute, und nicht dem Eigentümer oder dem Investor. Nur bei voller Transparenz der Heizkosten und entsprechender Sensibilisierung der Mieter können Mehrkosten bei der Investition die zu tieferen Heizkosten führen auch auf dem Markt einen Vorteil für den Investor sein, da die Warmmiete den entsprechenden Mietpreisvorteil abbildet. In Bezug auf die Gesetzgebung hilft die Wirtschaftlichkeitsanalyse, eventuell geforderte Massnahmen zur Energieeinsparungen mit anderen Massnahmen die bereits heute gefordert werden zu vergleichen.

4 Resultate und Diskussion

In den nachfolgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Raumtemperaturregelungsarten miteinander verglichen. Es sollen jeweils die Vor- und Nachteile der drei Regelungsvarianten ermittelt werden. Im Fokus der Auswertung stehen folgende Parameter:

- **$W_{el,WP}$** : Endenergieverbrauch der Wärmepumpe (Stromverbrauch)
- **WP_{Start}** : Ein- und Ausschaltzyklen der Wärmepumpe
- **Operative Raumtemperatur** (Mitte Raum)
- **Volumenstrom im Heizkreis**
- **Q_{th}** : Wärmeeintrag pro Zone oder Wohnung über die Fussbodenheizung oder angrenzende Wohnung
- **Überschreitung Solltemperatur**: Durchschnittliche Anzahl Stunden pro Zone in denen die Raumsolltemperatur um mehr als 0.5 K unterschritten wird
- **Überschreitung Solltemperatur**: Durchschnittliche Anzahl Stunden pro Zone in denen die Raumsolltemperatur um mehr als 1.5 K überschritten wird

Die Parameter „Überschreitung Solltemperatur“ und „Überschreitung Solltemperatur“ weisen bewusst ein Offset von 0.5 K und 1.5 K auf. Damit wird zum einen die Hysterese des Reglers mit berücksichtigt, und zum anderen gehen wir davon aus, dass in der Regel eine Übertemperatur vom Benutzer eher akzeptiert wird als eine Unterschreitung der gewünschten Temperatur.

Wenn nicht speziell vermerkt, wird in den Simulationen ein zur Norm abgeändertes Benutzerverhalten angenommen. Dieses basiert auf den Erkenntnissen aus dem Projekt ImmoGap [8]. Bei diesem Benutzerverhalten wird davon ausgegangen, dass pro Wohnung in der Übergangszeit ein Kippfenster in der Nacht geöffnet ist und die externe Fensterverschattung relativ häufig aktiv ist. Das offene Kippfenster befindet sich immer im Zimmer 1 der entsprechenden Wohnung (kein direkter Einfluss auf die Temperaturmessung im Fall der Referenzraumregelung).

4.1 Vergleich der drei Varianten zur Raumtemperaturregelung

4.1.1 Tiefe und homogene Raumtemperaturen in den Wohnungen

In einem ersten Schritt wurden die drei Raumregelungsarten mit Solltemperaturen in allen Zonen von 21 °C miteinander verglichen. In Abbildung 8 ist der Vergleich der wichtigsten Resultate zusammengefasst. Dabei weist die Referenzraumregelung den tiefsten Stromverbrauch und die geringste Anzahl an Einschaltzyklen der Wärmepumpe auf. Jedoch werden die gewünschten Temperaturen weniger gut eingehalten. Die Anzahl Stunden an denen die Raumsolltemperaturen um mehr als 0.5 K unterschritten werden beträgt bei der Referenzraumregelung im Schnitt pro Zimmer 703 h (fast Faktor 7.5) mehr gegenüber der Einzelraumregelung. Da man davon ausgehen kann, dass die Bewohner ihren Sollwert anpassen um in allen Zonen angenehme Temperaturen zu erhalten, wurde eine weitere Simulation mit Referenzraumregelung und erhöhter Solltemperatur von 22 °C durchgeführt. Durch die Erhöhung der Solltemperaturen reduzieren sich die Stunden mit einer

Temperaturunterschreitung massiv auf noch 101 h und der elektrische Energiebedarf der WP steigt um 1'242 kWh (+13%) gegenüber der Simulation mit Solltemperatur 21 °C und ist damit 931 kWh (+10%) höher als im Fall der Einzelraumregelung. Weiterführende Resultate sind im Anhang B aufgeführt in welchem die Unterschiede im Komfort zwischen Referenzraum- und Einzelraumregelung für eine ausgewählte Periode aufgezeigt werden.

Der elektrische Bedarf der Wärmepumpe (WP) ist um 3'551 kWh (-41%) tiefer mit einer Einzelraumregelung im Vergleich zur Simulation ohne Raumregelung die nur auf den Selbstregeleffekt vertraut (oranger Balken). Im Gegensatz dazu weist die Simulation ohne Raumregelung deutlich weniger Einschaltzyklen der WP auf (-63%), was in der Praxis schlussendlich zu tieferen Verlusten der Wärmepumpe führt. Dies wurde im Simulationsmodell jedoch nicht mitberücksichtigt.



Abbildung 8: Vergleich von Referenzraumregelung, Einzelraumregelung und keine Raumtemperaturregelung mit einer Soll-Temperatur von 21 °C (22 °C) in allen Zonen und einer Vorlauftemperatur bei Auslegung von 30 °C.

Betrachtet man die Temperaturverteilung (Abbildung 10) in den Zonen ohne Raumtemperaturregelung, dann fällt auf, dass diese deutlich höhere Raumtemperaturen aufweisen als jene mit Raumtemperaturregelung, was auch zu der hohen Anzahl Stunden mit Überschreitung der Solltemperatur führt. Dies macht deutlich, dass der sogenannte Selbstregeleffekt mit einer Vorlauftemperatur von 30 °C nicht ausreichend den Wärmeeintrag reduzieren kann um eine Übertemperatur in den Räumen zu verhindern. Insbesondere Wohnungen im Zwischengeschoss weisen sehr viel höhere Raumtemperaturen auf als am Regler eingestellt, da die Verluste über die Gebäudehülle deutlich geringer sind als im Erdgeschoss oder Obergeschoss (siehe Abbildung 10: 1.OG Wohnung Ost vs. 2.OG Wohnung Ost). Dies erklärt somit auch den erhöhten Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpe im Fall ohne Raumregelung, da der Wärmeeintrag deutlich grösser ausfällt auf Grund der ungenügenden Temperaturregulierung.



Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Zonen für alle drei Geschosse (grüne Wohnung = Wohnung West, orange Wohnung = Wohnung Ost).

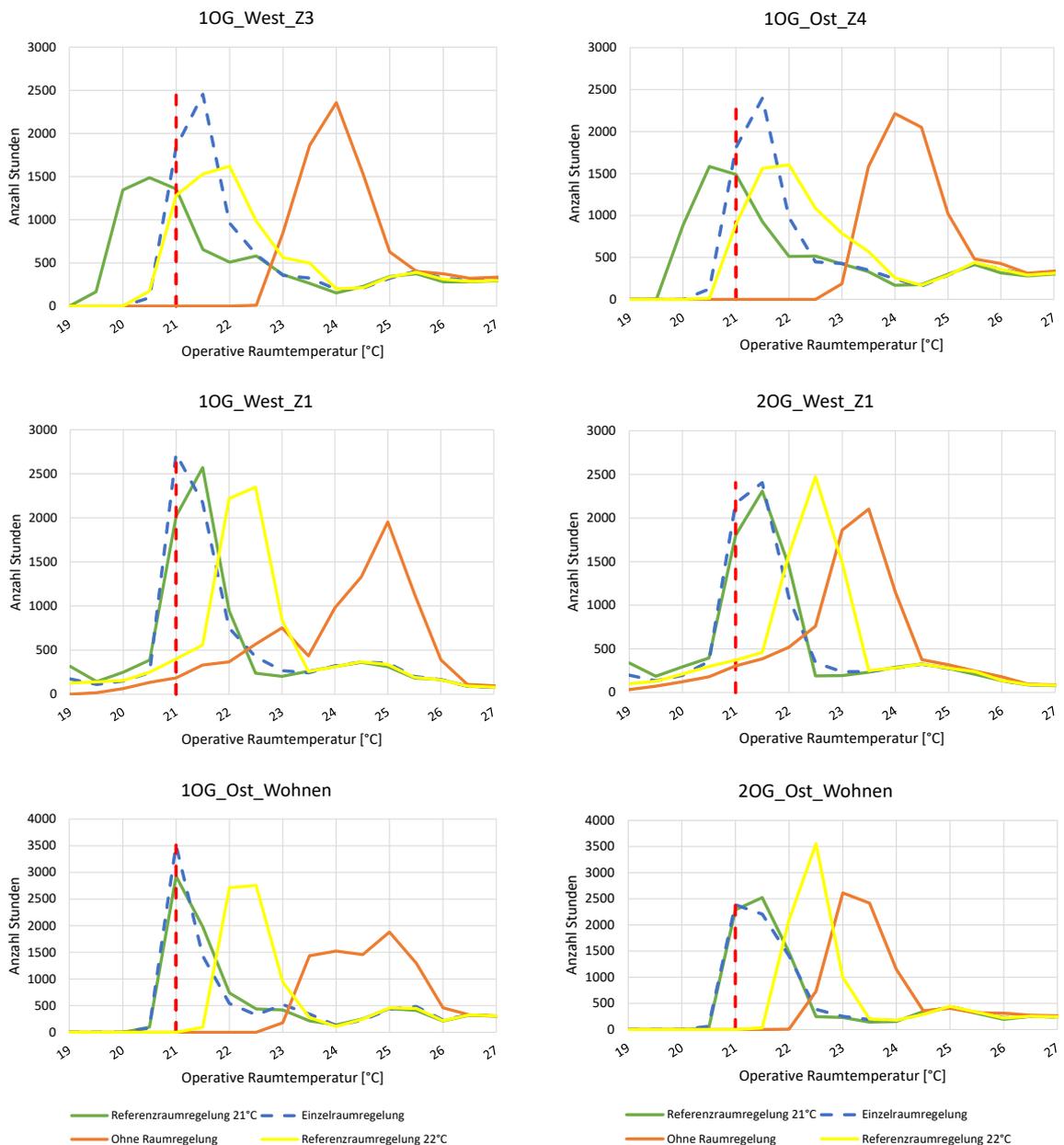


Abbildung 10: Temperaturprofil für ausgewählte Zonen und unterschiedlichen Raumtemperaturregelungsarten mit einer Vorlauftemperatur von 30°C. Die rote gestrichelte Linie zeigt die Raumsolltemperatur für die Einzelraumregelung.

Beim Vergleich des Volumenstromhistogramms in Abbildung 11 für die drei Regelungsvarianten wird deutlich, dass je nach Regelungsart der Volumenstrom ganz unterschiedliche Ausprägungen aufweist. Nur die Einzelraumregelung weist einen variablen Volumenstrom auf, was auch nicht anders zu erwarten ist, da die anderen beiden Regelungsvarianten nur die zwei Zustände EIN und AUS annehmen können. Mit einem Volumenstromhistogramm wie hier dargestellt, lässt sich bei einem Monitoring schnell feststellen welche Regelungsart eingesetzt wird und ob diese Ordnungsgemäss funktioniert.

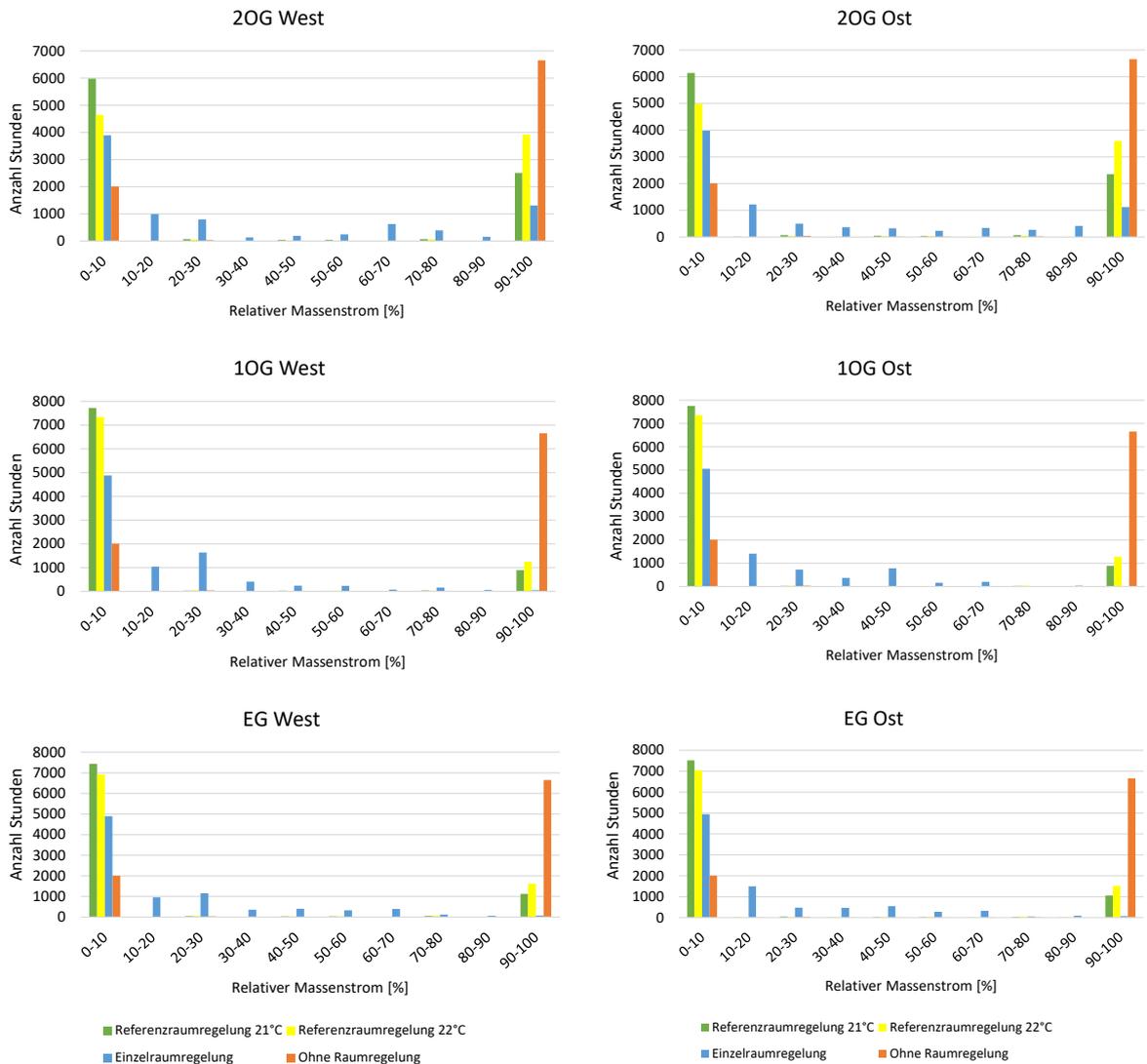


Abbildung 11: Histogramm des Stunden-Durchschnitts des Heizkreisvolumenstroms für die sechs Wohnungen und der drei Regelungsvarianten.

In Tabelle 5 ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammengefasst mit der Methode des annuitätischen Gewinns (siehe Kapitel 3.8). Als Referenz dient die Variante ohne Raumregelung. Es wurden ein Kapitalzinssatz von 3%, eine Nutzungsdauer von 15 Jahren und mittlere Stromkosten von 22 Rp/kWh angenommen. Bei den Stromkosten handelt es sich um einen durchschnittlichen Preis über 15 Jahre, ausgehend von 20.5 Rp/kWh und einer Preissteigerung von einem Prozent pro Jahr [17].

Die Auswertung zeigt, dass sich die Investition im Fall der Referenzraumregelung knapp lohnt. Die Mehrkosten einer Einzelraumregelung lassen sich jedoch unter diesen Bedingungen nicht amortisieren.

Tabelle 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der drei Regelungsvarianten.

Kennwerte	Keine Raumregelung	Einzelraumregelung	Referenzraumregelung
$W_{el,WP}$	12'055 kWh/a	8'504 kWh/a	9'435 kWh/a
Investitionskosten ³	-	19'800 Fr	4'320 Fr
Wartungskosten (1‰ der Investition)	-	19.8 Fr/a	4.3 Fr/a
Amortisationszeit	-	25.3 Jahre	7.5 Jahre
Annuitätischer Gewinn	-	-897 Fr/a*	210 Fr/a*

* im Vergleich zu ohne Raumtemperaturregelung

³ Laut AHB Zürich kostet eine Einzelraumregelung pro Regelkreis um die 600 Fr. Für die Referenzraumregelung wurde zusätzlich zu den Kosten pro Regelkreis ein Mindermengen-Zuschlag von 20% addiert.

4.1.2 Erhöhte und inhomogene Raumtemperaturen in den Wohnungen

Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Bewohner in einem MFH alle ihre Raumthermostate auf 21 °C einstellen [8]. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich der Raumregelungsarten mit erhöhten Raumtemperaturen durchgeführt. Die Zonen/Wohnungen weisen im gesamten Erdgeschoss (EG) sowie im zweiten Obergeschoss (2.OG) eine Solltemperatur von 24 °C und im ersten Obergeschoss (1.OG, Zwischengeschoss) eine Solltemperatur von 21 °C auf. Um die höheren Raumtemperaturen zu erreichen wurde die Vorlauftemperatur von 30 °C auf 35 °C erhöht, was in der Praxis üblicherweise gemacht wird um den Komfortansprüchen der Bewohner gerecht zu werden. Denn unabhängig von der Regelungsart können Raumtemperaturen von 24 °C mit einer Vorlauftemperatur von 30 °C nicht überall im zweiten Obergeschoss erreicht werden.

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 12 zeigen, dass der Unterschied zwischen der Referenzraumregelung und der Einzelraumregelung bezüglich Strombedarf vernachlässigbar klein ist. Im Gegensatz dazu ist der Vergleich zwischen der Einzelraumregelung und dem Fall ohne Raumtemperaturregelung mit einer Differenz von 4'088 kWh (+33% ohne Raumtemperaturregelung) sehr gross. Auffällig sind bei der Referenzraumregelung (grüner Balken) die vielen Stunden an denen die Solltemperatur um mehr als 0.5 K unterschritten wird. Dies ist vor allem darauf zurück zu führen, dass die hohen Raumtemperaturen von 24 °C im EG schlechter eingehalten werden als mit der Einzelraumregelung. Dies kann man am Beispiel von Zimmer 3 im EG West erkennen (siehe Abbildung 15). Deshalb wurde eine weitere Simulation mit erhöhter Vorlauftemperatur (+2 K) und erhöhten Solltemperaturen im EG (+0.5 K) durchgeführt (gelber Balken). Die Unterschreitung der Solltemperatur kann markant reduziert werden, jedoch nicht ganz auf das Niveau der Einzelraumregelung. Durch die Erhöhung der Temperaturen benötigt die Referenzraumregelung 538 kWh (+4%) mehr elektrische Energie als die Einzelraumregelung.

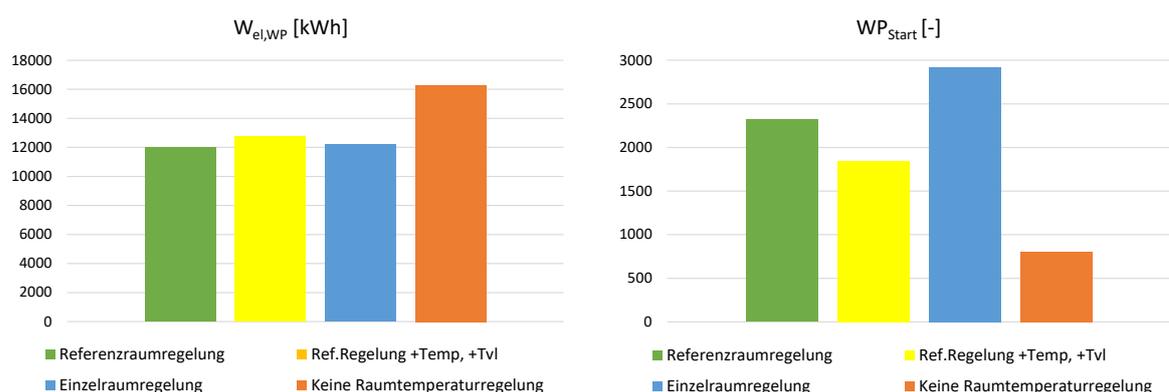


Abbildung 12: Vergleich von Referenzraumregelung, Einzelraumregelung und keine Raumtemperaturregelung mit einer Soll-Temperatur von 21/22°C (1.OG) bis 24°C (EG, 2.OG) und einer Vorlauftemperatur bei Auslegung von 35°C.

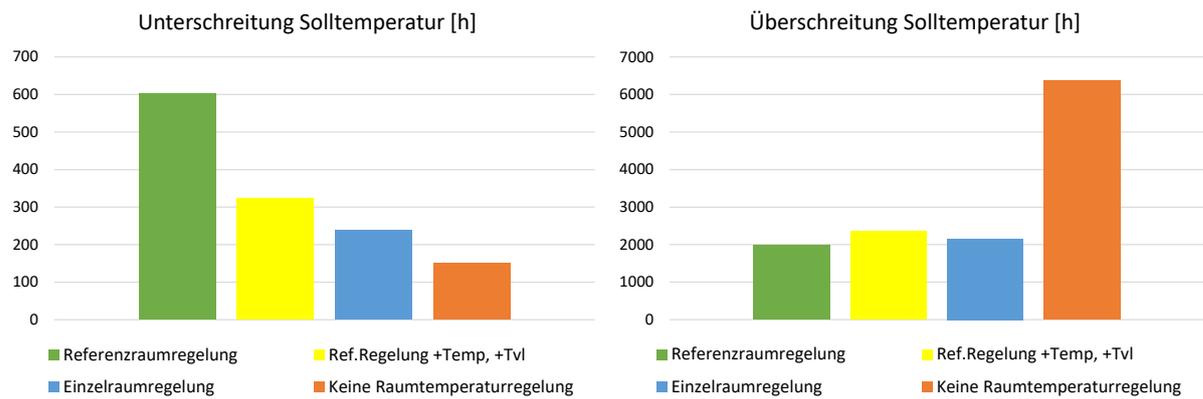


Abbildung 13: Vergleich der Komfortwerte für Referenzraumregelung, Einzelraumregelung und keine Raumtemperaturregelung mit einer Soll-Temperatur von 21/22°C (1.OG) bis 24°C (EG, 2.OG) und einer Vorlauftemperatur bei Auslegung von 35°C.

Auf Grund der höheren Vorlauftemperatur steigen die Raumtemperaturen bei fehlender Raumregelung nochmals deutlich an, was in der Abbildung 15 zu erkennen ist. Dies überrascht nicht, da der Selbstregeleffekt erst bei höheren Raumtemperaturen zu wirken beginnt. Damit wird deutlich, dass jene Gebäude ohne Raumtemperaturregelung massiv anfälliger sind auf Veränderungen im Bereich der Heizungsparameter und damit auch viel anspruchsvoller im Betrieb sind.

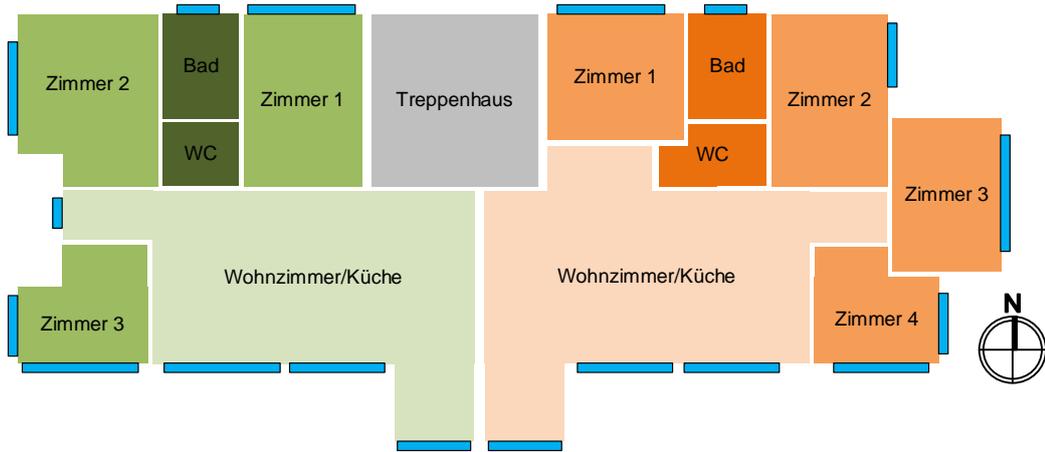


Abbildung 14: Vereinfachte Darstellung der Zonen für alle drei Geschosse (grüne Wohnung = Wohnung West, orange Wohnung = Wohnung Ost).

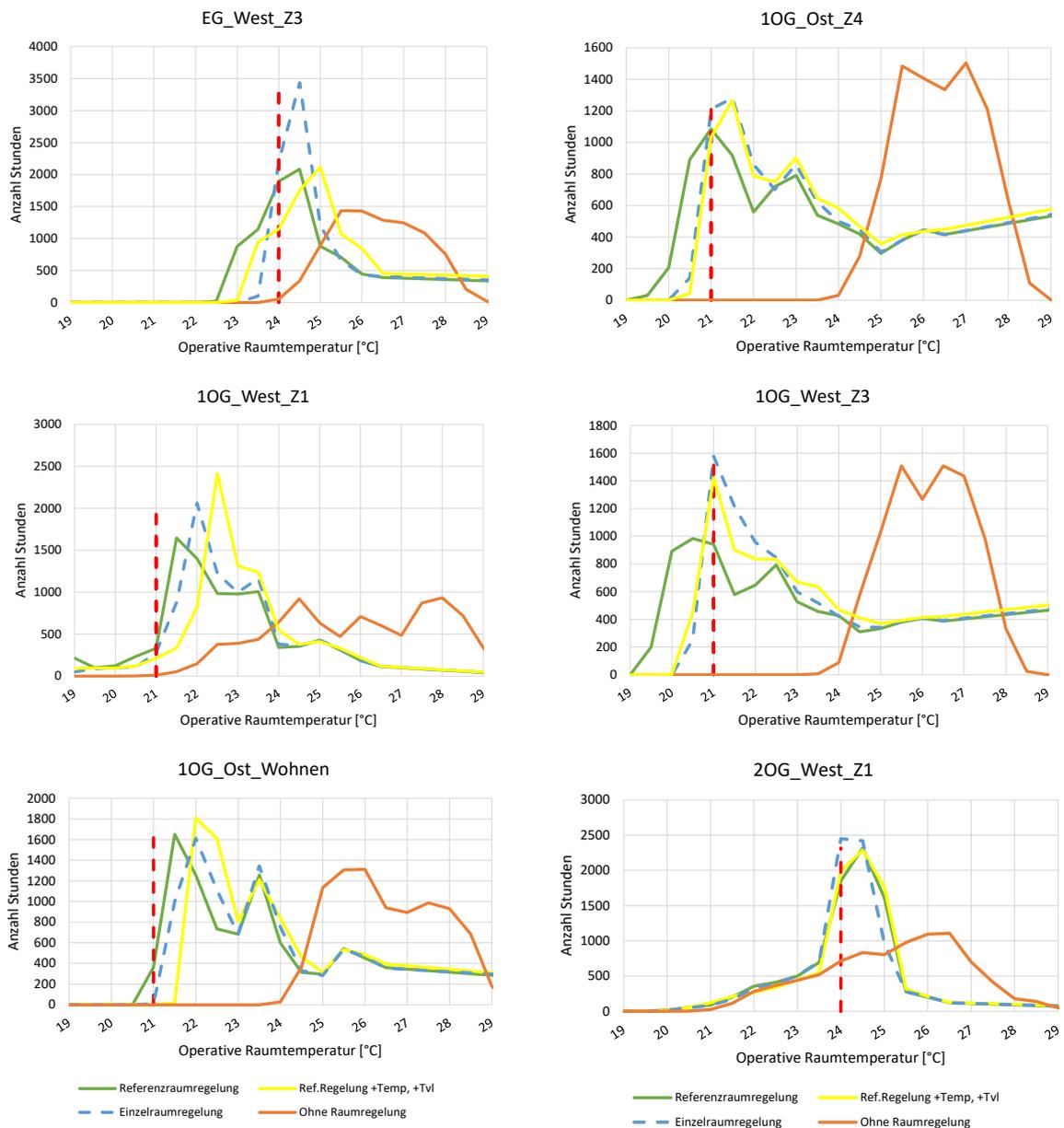


Abbildung 15: Temperaturprofil für ausgewählte Zonen mit Referenzraumregelung und Einzelraumregelung sowie ohne Raumregelung mit einer Vorlauftemperatur von 35°C. Die rote Linie zeigt die gewünschte Raumsolltemperatur.

In Abbildung 16 sind die Temperaturprofile von ausgewählte Zonen im Zwischengeschoss (1.OG) dargestellt. Auf der linken Seite sind die Resultate mit einer Raumtemperatureinstellung von 21 °C in allen Zonen aufgeführt und auf der rechten Seite die Resultate mit erhöhten Temperaturanforderungen im EG und im 2.OG (24 °C). Dabei fällt auf, dass durch die erhöhten Temperaturen im EG und im 2.OG die Temperaturen im Zwischengeschoss unabhängig von der Regelungsart höher ausfallen. Der Temperaturanstieg ist jedoch deutlich grösser wenn keine Raumregelung eingesetzt wird. Hier muss man davon ausgehen, dass der Wärmetransfer zwischen den Geschossen ausgeprägt ist. Diesem Effekt wird im Kapitel 4.4 vertiefter nachgegangen.

Simulation alle Wohnung mit Solltemp. von 21 °C

Simulation EG und 2.OG mit Solltemp. von 24 °C

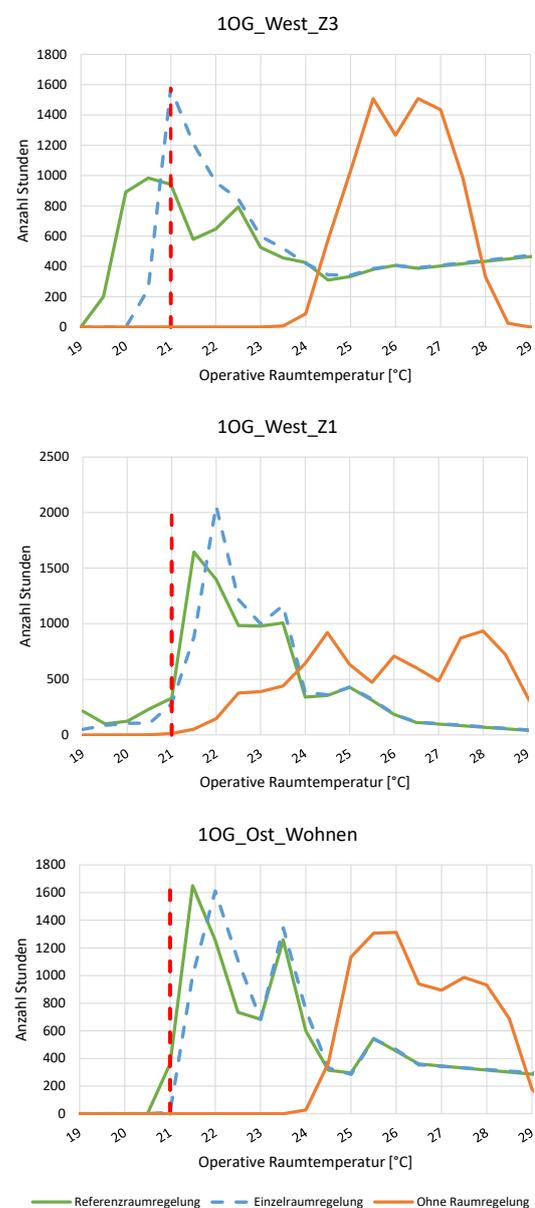
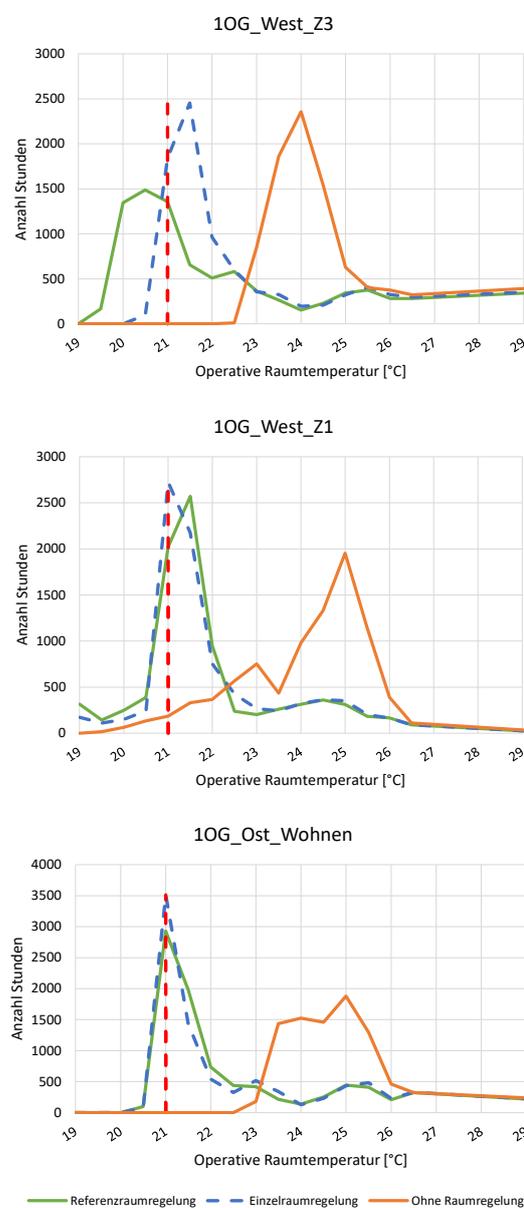


Abbildung 16: Temperaturprofil für ausgewählte Zonen mit unterschiedlichen Regelungsarten. Auf der linken Seite mit homogenen Raumtemperaturen von 21°C und Vorlauftemperatur von 30°C und rechts mit erhöhten Temperaturen im EG und 2.OG und Vorlauftemperaturen von 35°C.

4.1.3 Einfluss der Verschattungsregelung

Die solaren Gewinne können einen grossen Einfluss haben auf die Raumtemperaturregelung, wie dies in Vorarbeiten [4] schon aufgezeigt wurde. Deshalb wurde neben der **Standardverschattung** (geringe solare Gewinne) auch eine von der **Jahreszeit abhängige Verschattung** eingeführt. Diese erlaubt höhere solare Gewinne im Winter (siehe Kapitel 3.3). In Abbildung 17 werden die Resultate mit der jahreszeitlich abhängigen Verschattung und erhöhten Raumtemperaturanforderungen (24 °C im EG und 2.OG) präsentiert. Der Mehrbedarf an elektrischer Energie für die Wärmepumpe ohne Raumtemperaturregelung beträgt gegenüber der Einzelraumregelung 4'586 kWh (+39%). Dies sind sechs Prozentpunkte mehr als mit der Standardverschattung was darauf hindeutet, dass bei höheren Solargewinnen die Einzelraumregelung den Wärmeeintrag besser kontrollieren kann als der Selbstregeleffekt. Dies ist jedoch naheliegend, da die Vorlauftemperaturen mit 35 °C sehr hoch sind und damit der Betrieb des Gebäudes ohne Raumtemperaturregelung keinen Sinn macht. Vergleicht man die Einzelraumregelung mit der Referenzraumregelung, so können keine nennenswerten Unterschiede zu den vorangehenden Simulationen ermittelt werden. Die Referenzraumregelung schneidet leicht besser ab bezüglich Strombedarf, erreicht jedoch nicht zu jeder Zeit in allen Zonen die gewünschten Temperaturen. Einer Erhöhung der Raumtemperaturen um 1 K im 1.OG würde dazu führen, dass die Wärmepumpe mit der Referenzraumregelung leicht mehr Strom benötigt als mit einer Einzelraumregelung, und somit die Unterschiede gering sind (analog zum Kapitel 4.1.2).

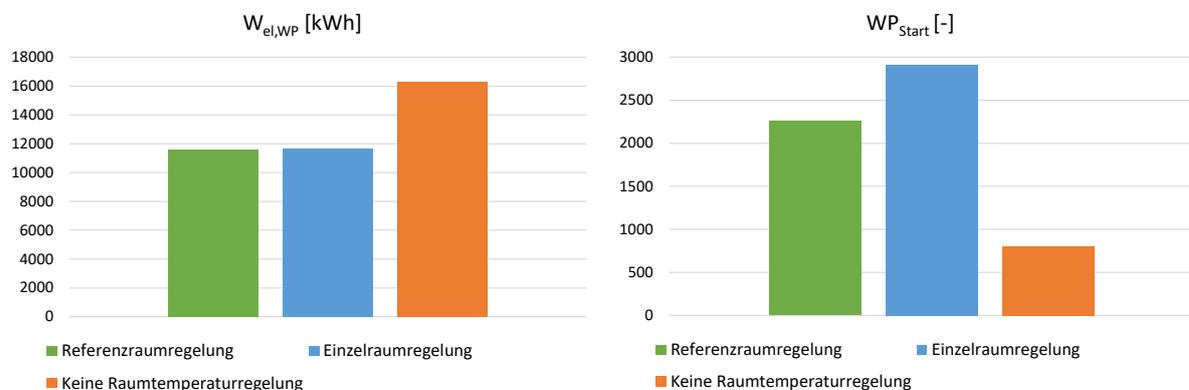


Abbildung 17: Vergleich von Referenzraumregelung, Einzelraumregelung und keine Raumtemperaturregelung mit einer Soll-Temperatur von 21 °C (1.OG) bis 24 °C (EG, 2.OG), einer Vorlauftemperatur bei Auslegung von 35 °C und einer jahreszeitabhängigen Verschattung.

4.2 Individuelle Raumtemperaturabsenkung

In vorangehenden Arbeiten [2], [4] konnte aufgezeigt werden, dass in einem Einfamilienhaus dank der Einzelraumregelung unterschiedliche Raumtemperaturen erzielt werden können. Es konnte mit Simulationen und realen Messungen aufgezeigt werden, dass einzelne Räume, die nicht mehr genutzt werden, deutlich abgesenkt werden können und damit auch eine Energieeinsparung einhergeht. Nachfolgend werden entsprechend Resultate präsentiert, welche auf Simulationen mit unterschiedlichen Zonentemperaturen innerhalb der Wohnungen basieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Positionierung der Zuluft und Abluft in der Wohnung als auch die Stellung der Türen (geschlossen/offen) einen Einfluss auf die Resultate haben. Deshalb wurden drei unterschiedliche Fälle für die Simulation mit Einzelraumregelung angenommen:

- Mit „Einzelraumlüftung“ (Zuluft und Abluft im selben Raum) und alle Zimmertüren offen
- Mit Überströmlüftung (Zuluft im Zimmer, Abluft in Bad und Küche) und alle Zimmertüren offen
- Mit Überströmlüftung und alle Zimmertüren geschlossen

Als Vergleichsbasis dienen zwei Simulationen mit Referenzraumregelung und Überströmlüftung (Stand der Technik) einmal mit offenen Türen und einmal mit geschlossenen Türen. In Abbildung 18 sind die Temperatureinstellung in den einzelnen Zonen und Geschossen dargestellt. Bei der Referenzraumregelung dient die Zone Wohnen/Küche als Referenzraum mit der entsprechenden Solltemperatur welche für die gesamte Wohnung gilt. In Tabelle 6 sind die durchschnittlichen Temperaturen pro Wohnung dargestellt. Naturgemäss sind die durchschnittlichen Temperaturen tiefer bei den Simulationen mit raumweiser Temperaturregelung. Die Solltemperatur der Referenzraumregelung entspricht immer der höchsten Temperatur in der entsprechenden Wohnung (Abdeckung des grössten Bedürfnisses).

Tabelle 6: Gewichtete durchschnittliche Wohnungstemperaturen für die Simulation mit Einzelraum- und Referenzraumregelung (Gewichtung mit Zonenfläche).

Wohnung	Einzelraumregelung	Referenzraumregelung
	[°C]	[°C]
EG West	20.9	23
EG Ost	22.4	23
1.OG West	20.6	22
1.OG Ost	21.7	23
2.OG West	21.4	24
2.OG Ost	22.7	24
Gesamtes Gebäude	21.6	23.2



Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung der Zonen für alle drei Geschosse (grüne Wohnung = Wohnung West, orange Wohnung = Wohnung Ost).

In Abbildung 19 ist der elektrische Verbrauch der Wärmepumpe für alle Varianten dargestellt. Im Vergleich zur „Einzelraumlüftung“ weist die Überströmlüftung geringere Luftmengen (-28%) auf, weil im Gegensatz zur „Einzelraumlüftung“ keine Frischluft im Badezimmer und Küche eingebracht werden. Auf Grund der reduzierten Luftmengen fällt der elektrische Verbrauch um 198 kWh (-2%) geringer aus für die Simulation mit Überströmlüftung. Die elektrischen Energieeinsparungen mit einer Einzelraumregelung gegenüber der Referenzraumregelung betragen bei offenen Türen und einer Überströmlüftung 1'413 kWh (14%), und bei geschlossenen Türen 944 kWh (10%). Die geschlossenen Türen haben einen deutlichen Effekt auf den elektrischen Stromverbrauch. Der Vergleich zwischen offenen und geschlossener Tür im Fall der Einzelraumregelung zeigt, dass geschlossene Türen zu einem Minderverbrauch von 1'101 kWh (-12%) führen gegenüber den offenen Türen. Dies ist damit zu erklären, dass die eher tiefen Raumtemperatursollwerte besser eingehalten werden können mit geschlossenen Türen. Dies ist auch aus Abbildung 22 bis Abbildung 24 für die Zonen „EG West Zimmer 1“, „1OG West Zimmer 1“ und „2OG Ost Zimmer 3“ ersichtlich. Auch die Referenzraumregelung weist einen tieferen Strombedarf auf wenn die Türen geschlossen sind, jedoch auf Kosten des Komforts. Bei geschlossenen Türen steigen die Anzahl Stunden an denen die Solltemperatur unterschritten wird deutlich an. Dies ist dadurch begründet, dass bei geschlossenen Türen in den Eckzonen mit viel Aussenfläche und grossem Fensteranteil die Temperaturen viel häufiger nicht mehr erreicht werden (siehe Abbildung 20).

Die Einzelraumregelung mit Überströmlüftung und geschlossenen Türen benötigt 944 kWh (-10%) weniger Strom als die Referenzraumregelung unter gleichen Bedingungen. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass die gewünschten Temperaturen in den unterschiedlichen Zonen besser eingehalten werden können und damit im Schnitt tiefere Wohnungstemperaturen erzielt werden. Im Fall der Referenzraumregelung weisen alle Räume ähnliche Temperaturen auf, da diese vom Referenzraum „Wohnzimmer/Küche“ abhängig sind.

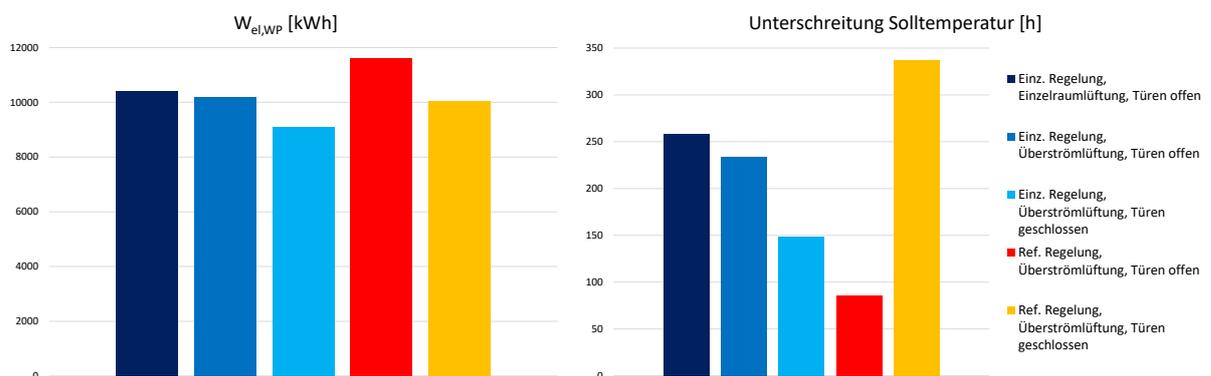


Abbildung 19: Vergleich der Simulationen mit offenen oder geschlossenen Türen und unterschiedlichen Lüftungsvarianten mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C unter Auslegungsbedingungen.

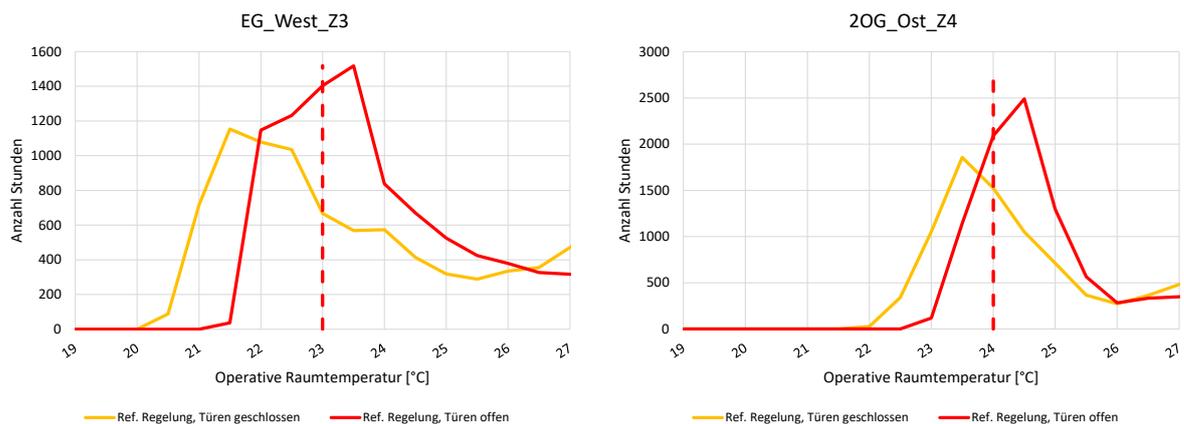


Abbildung 20: Temperaturfrequenzen im Fall der Referenzraumregelung mit offenen und geschlossenen Türen mit einer Überströmlüftung.

In Abbildung 22 bis Abbildung 24 sind die Temperaturverläufe einiger Zonen pro Wohnung und Stockwerk dargestellt. Dabei stellt die rote Markierung die Solltemperatur der Einzelraumregelung für den jeweiligen Raum dar. Die Auswertung zeigt, dass eine Temperaturabsenkung zwischen den Zonen vor allem dann möglich ist, wenn die Türen geschlossen sind, und die entsprechende Zone viele Aussenwände aufweist (siehe Beispiel 2.OG Abbildung 21).

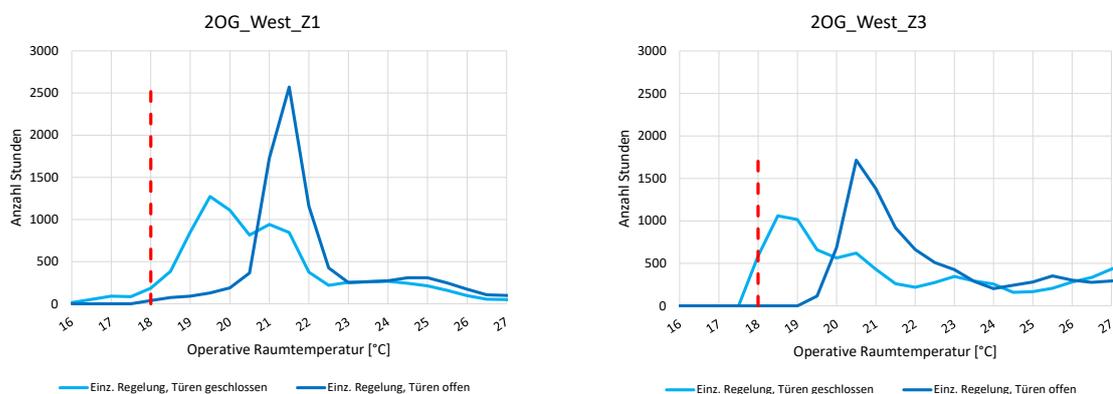


Abbildung 21: Vergleich der Einzelraumregelung mit geschlossenen und offenen Türen für zwei Zonen mit tiefer Solltemperatur (Raumtemperaturabsenkung) und einer Überströmlüftung.

Die Auswertung der Wohnung Ost im zweiten Obergeschoss (Abbildung 24) zeigt, dass eine Erhöhung der Raumtemperatur dank der Einzelraumregelung in der Hauptzone „Wohnen/Küche“ gegenüber den anderen Zonen möglich ist. Jedoch können die „gewünschten“ 24 °C nicht eingehalten werden, wenn die Türen nicht geschlossen sind. Überwiegend geschlossene Zimmertüren sind vermutlich nur dann anzutreffen, wenn ein Zimmer nicht bewohnt oder nicht benutzt wird. Dies kann zum Beispiel dann der Fall sein, wenn es sich um das Schlafzimmer eines Kindes handelt, welches bereits erwachsen geworden und ausgezogen ist, oder wenn es sich um ein Gästezimmer handelt. Bei voller Belegung der Wohnung ist wahrscheinlich, dass vor allem im Schlafzimmer tiefere Temperaturen gewünscht werden, und deshalb der Sollwert am Thermostat bei geschlossenen Türen reduziert wird, was dem Szenario entspricht, dass ein Zimmer einen Sollwert von 18 °C aufweist.

OpEEr – Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Einzelraumtemperaturregelung

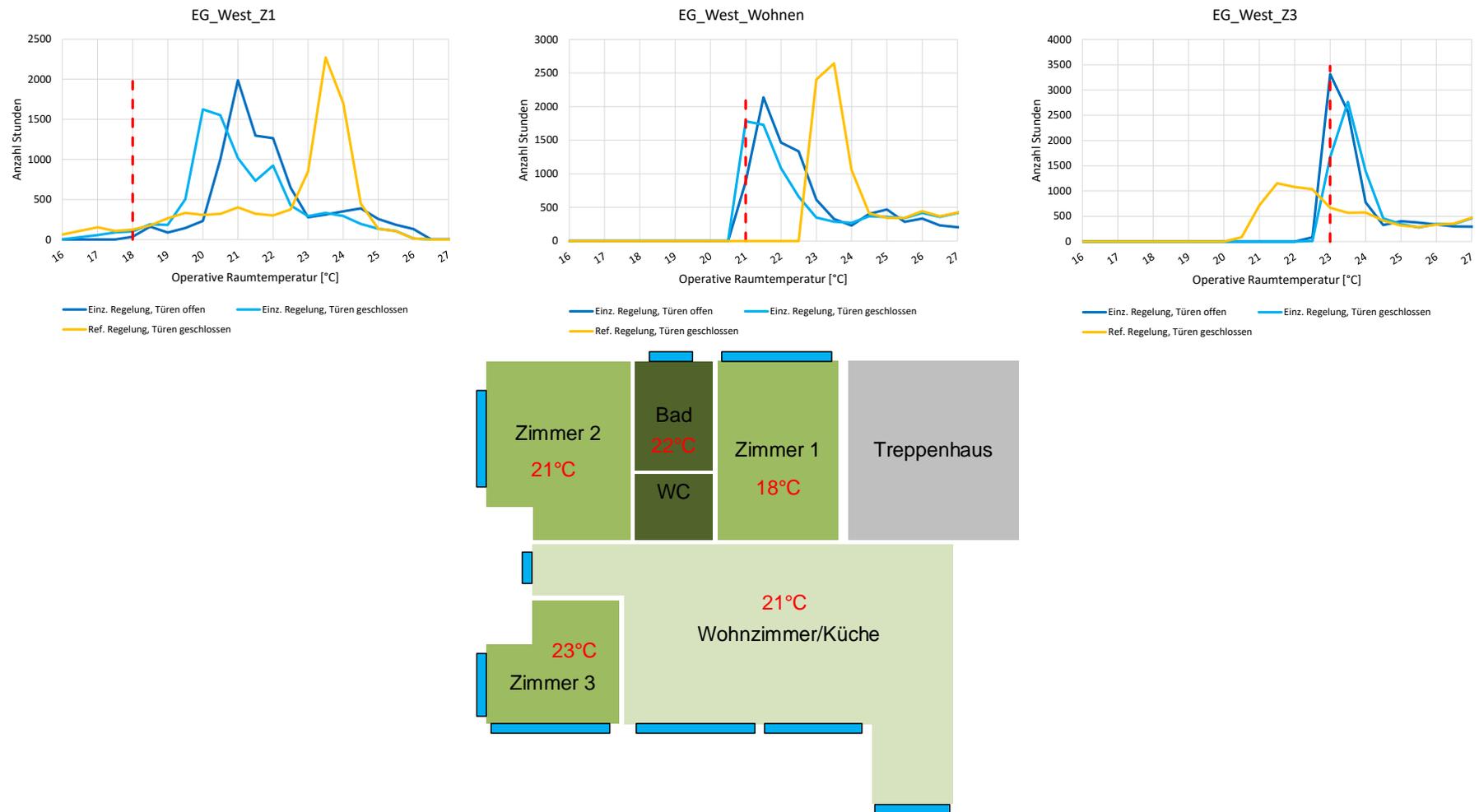


Abbildung 22: Temperatúrauswertung für Simulationen mit offenen oder geschlossenen Türen und Überströmlüftung für das Erdgeschoss. Abbildung unten zeigt die gewünschten Solltemperaturen.

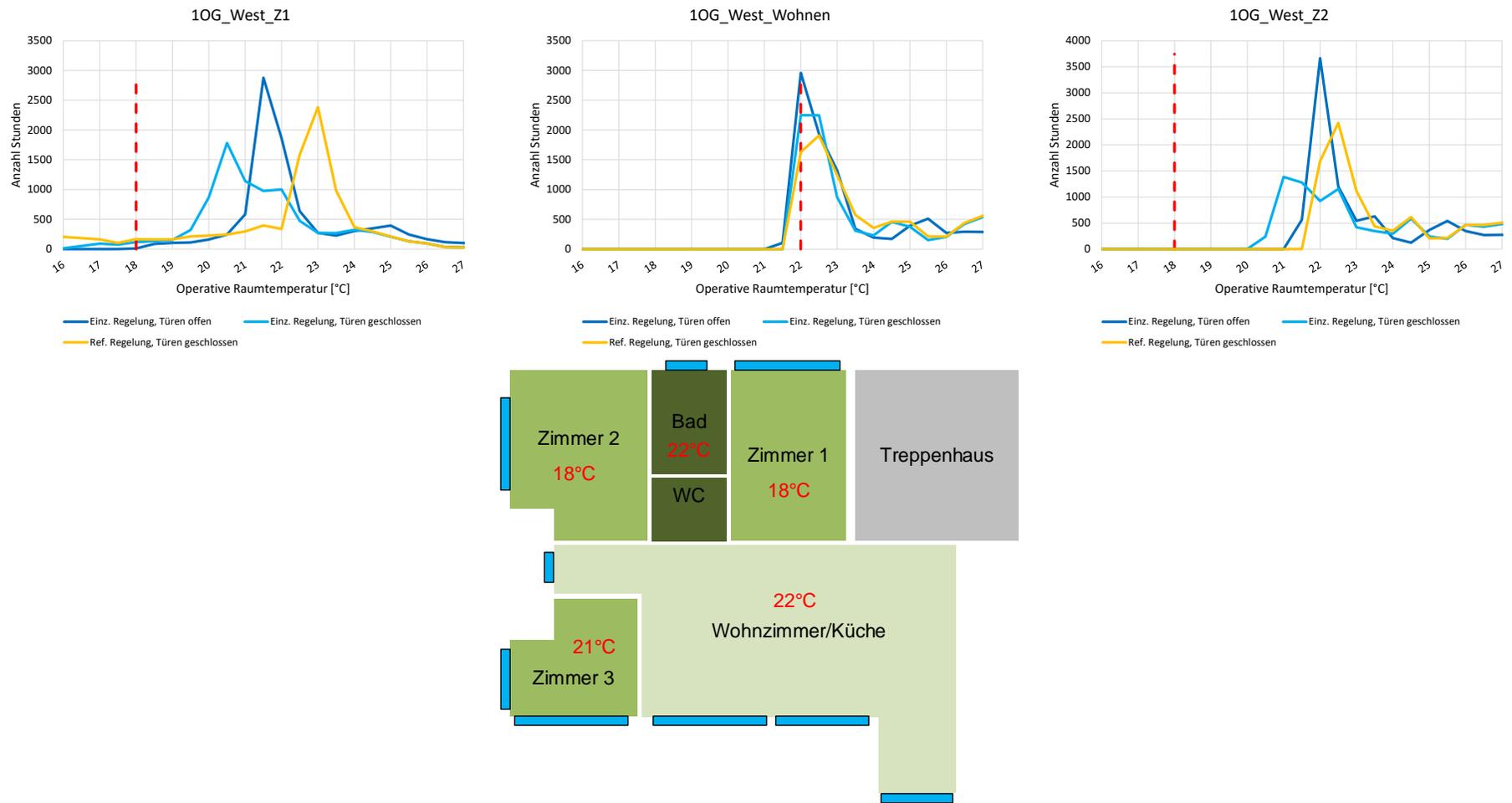


Abbildung 23: Temperatúrauswertung für Simulationen mit offenen oder geschlossenen Türen und Überströmlüftung für das Zwischengeschoss. Abbildung unten zeigt die gewünschten Solltemperaturen.

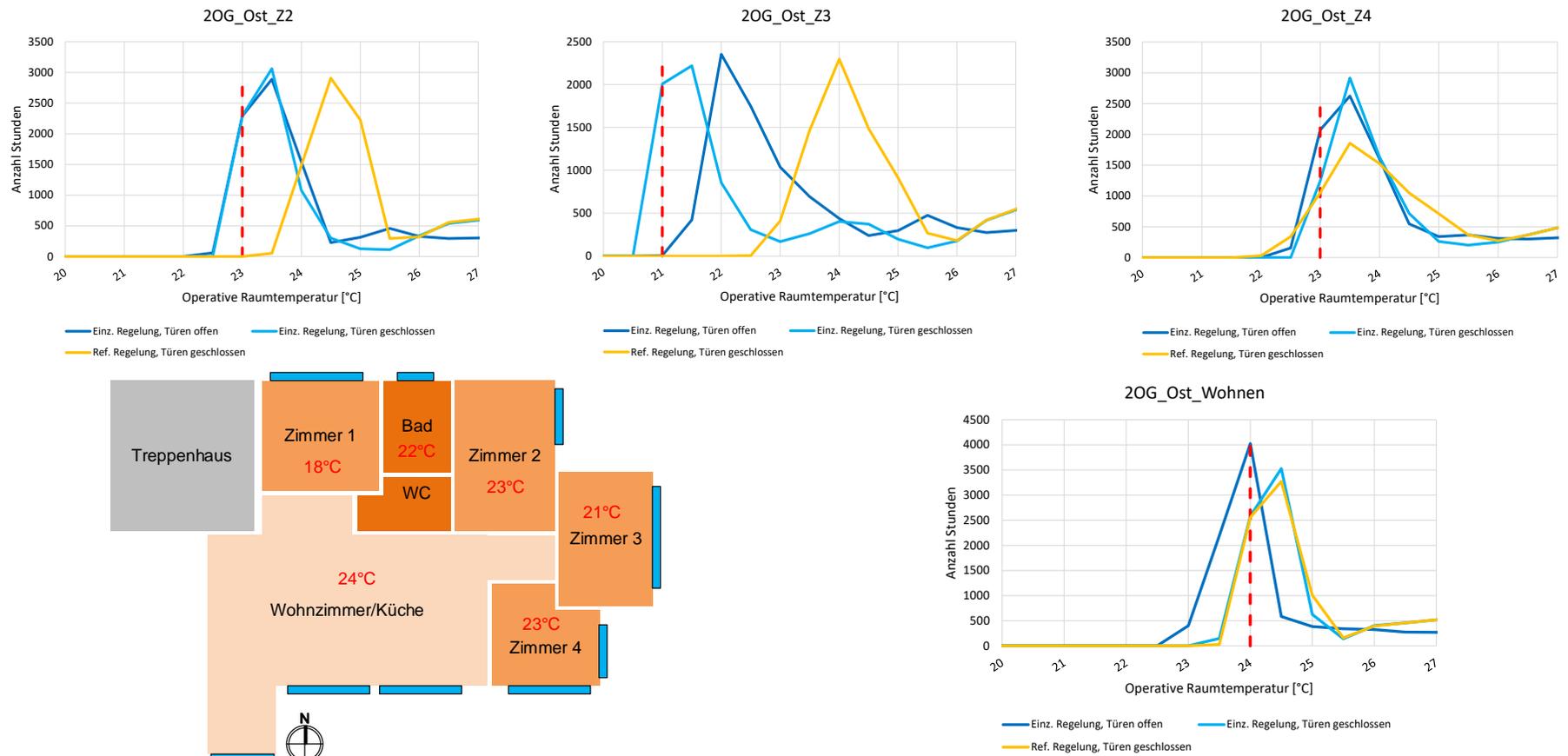


Abbildung 24: Temperaturauswertung für Simulationen mit offenen oder geschlossenen Türen und Überströmlüftung für das Obergeschoss. Abbildung unten links zeigt die gewünschten Solltemperaturen.

In Tabelle 7 und Tabelle 8 ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (basierend auf der Methode des annuitätischen Gewinns, siehe Kapitel 3.8) unter Berücksichtigung der Varianten mit individueller Temperatureinstellung zusammengefasst. Für alle Vergleiche dient als Referenz die Simulation ohne Raumregelung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C welche eine Unterschreitung der Solltemperaturen von nur 35 h aufweist, ohne dabei zu berücksichtigen, dass hohe Raumtemperaturen evt. dazu führen könnten, dass die Bewohner mittels Fensterlüftung die überhöhten Temperaturen korrigieren. Die Auswertung zeigt, dass sich die Investition in eine Einzelraumregelung in beiden Fällen (offene und geschlossene Türen) nicht lohnt gegenüber dem Fall ohne Raumregelung. Die Referenzraumregelung ist unter den angenommenen Bedienungen in beiden Fällen wirtschaftlich. Bei den Stromkosten handelt es sich um einen durchschnittlichen Preis über 15 Jahre, ausgehend von 20.5 Rp/kWh und einer Preissteigerung von einem Prozent pro Jahr [17].

*Tabelle 7: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der drei Regelungsvarianten bei **offenen Zimmertüren**, mit einem Kapitalzinssatz von 3%, einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und Stromkosten von 22 Rp/kWh.*

Kennwerte	Keine Raumregelung	Einzelraumregelung	Referenzraumregelung
$W_{el,WP}$	16'284 kWh/a	10'201 kWh/a	11'614 kWh/a
Investitionskosten ⁴	-	19'800 Fr	4'320 Fr
Wartungskosten (1‰ der Investition)	-	19.8 Fr/a	4.3 Fr/a
Amortisationszeit	-	14.8 Jahre	4.2 Jahre
Annuitätische Gewinn	-	-340 Fr/a*	661 Fr/a*

* im Vergleich zu ohne Raumtemperaturregelung

*Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der drei Regelungsvarianten bei **geschlossenen Zimmertüren**, mit einem Kapitalzinssatz von 3%, einer Nutzungsdauer von 15 Jahren und Stromkosten von 22 Rp/kWh.*

Kennwerte	Keine Raumregelung	Einzelraumregelung	Referenzraumregelung
$W_{el,WP}$	13'961 kWh/a	9'100 kWh/a	10'044 kWh/a
Investitionskosten ⁴	-	19'800 Fr	4'320 Fr
Wartungskosten (1‰ der Investition)	-	19.8 Fr/a	4.3 Fr/a
Amortisationszeit	-	18.5 Jahre	5.0 Jahre
Annuitätische Gewinn	-	-609 Fr/a*	496 Fr/a*

* im Vergleich zu ohne Raumtemperaturregelung

⁴ Laut AHB Zürich kostet eine Einzelraumregelung pro Regelkreis um die 600 Fr. Für die Referenzraumregelung wurde zusätzlich zu den Kosten pro Regelkreise ein Mindermengen-Zuschlag von 20% addiert.

4.3 Der Wärmefluss zwischen den Wohnungen

Beim Auswerten der Wärmeströme zwischen den Wohnungen fällt auf, dass es Fälle gibt, bei denen unabhängig von der Raumregelung das Zwischengeschoss einen extrem tiefen Wärmebedarf und höhere Temperaturen als gewünscht aufweist. Sowohl eigene Erfahrungen als auch Gespräche mit Bewohnern von Mehrfamilienhäusern die in einem Zwischengeschoss leben, bestätigen die Erkenntnisse aus der Simulation. Oft kann die Temperatur gar nicht gesenkt werden, ohne die Thermostateinstellungen fast auf das Minimum zu stellen, was häufig im Mietvertrag verboten wird (Gründe: „Wärmeklau“ und Bauschadenvermeidung). Nachfolgend werden Resultate zu diesem Thema präsentiert.

In Abbildung 25 sind die Wärmeflüsse der Bodenheizung für drei verschiedene Simulationen mit der Referenzraumregelung dargestellt. Dabei wird unterschieden wieviel Wärmeeintrag übers Jahr in die Wohnung geht (blauer Balken) und wieviel Heizwärme der Bodenheizung in die Zone darunter geht (oranger Balken, negativer Wert). Die beiden ersten Grafiken zeigen den Wärmefluss für die Simulationen mit homogenen Zonentemperaturen in allen Räumen von 21 °C (links) und 24 °C (rechts). Unabhängig vom Temperatursollwert ist der Bedarf für das 2.OG deutlich am grössten mit einem Anteil am Gesamtwärmebedarf von 52% (Zonentemp. = 21 °C) und 49% (Zonentemp. = 24 °C). Das erste Obergeschoss hat einen Anteil von 20%. Geht man davon aus, dass im Erdgeschoss und zweiten Obergeschoss eine höhere Solltemperatur (+3 K) gegenüber dem Zwischengeschoss eingestellt wird, beträgt der Anteil am Gesamtwärmebedarf im Zwischengeschoss nur noch 1%. Wie in der Grafik links unten zu sehen ist, wird der orange Balken für das Zwischengeschoss positiv, was bedeutet, dass vom Erdgeschoss Wärme nach oben fließt. Damit reduziert sich der Wärmebedarf im Zwischengeschoss um ganze 6'444 kWh (-93%), und im Gegenzug erhöht sich der Wärmebedarf im Erdgeschoss um 4'049 kWh (+28%) und im zweiten Obergeschoss um 3'205 kWh (+13%). Damit steigen die Heizkosten für die Bewohner mit erhöhten Raumtemperaturen nicht nur auf Grund des höheren Raumsollwertes sondern auch weil die „Verluste“ gegenüber den normal beheizten Wohnungen ansteigen. Die Bodenheizung ist kaum aktiv im Fall, dass die darüber und darunter liegenden Wohnungen höher geheizt werden (blauer Balken sehr klein, Bild links unten).

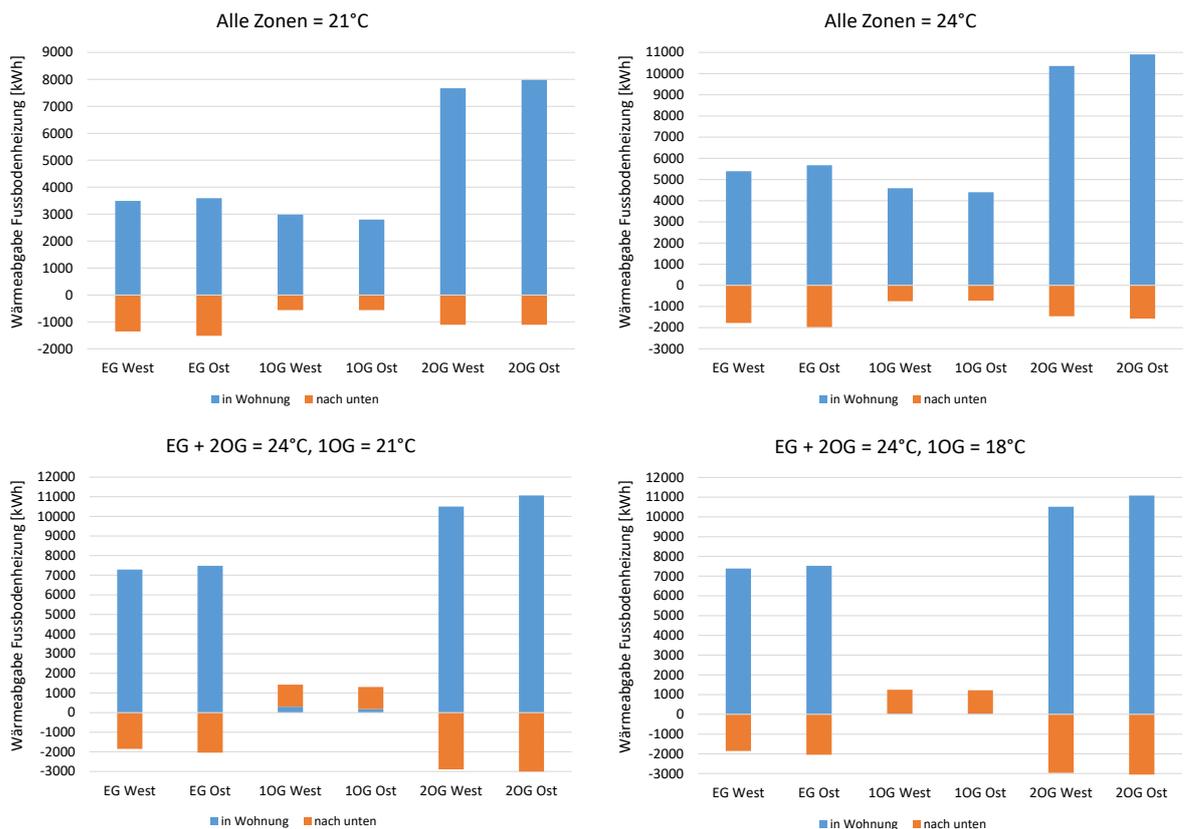


Abbildung 25: Wärmebilanz der Fussbodenheizung für drei unterschiedliche Temperatureinstellungen, simuliert mit Referenzraumregelung und einer Vorlauftemperatur von 35 °C.

In Abbildung 26 sind die Temperaturverläufe für die Wohnung Ost im Zwischengeschoss für die Simulationen mit homogener Solltemperatur in allen Zonen (21 °C) sowie den erhöhten Solltemperaturen dargestellt. Man kann erkennen, dass die Temperaturen den Sollwert deutlich häufiger überschreiten wenn in den Wohnungen darüber und darunter höhere Raumtemperaturen vorherrschen. Eine Konsequenz davon könnte sein, dass die Bewohner im Zwischengeschoss häufiger über die Fensterlüftung eine zu hohe Raumtemperatur korrigieren. Dies hätte zur Folge, dass der Mehrverbrauch an Wärme deutlich ansteigt. Dies könnte einen Teil des „Energy Performance Gap“ bei Mehrfamilienhäusern erklären (Hypothese). Weiter kann man erkennen, dass die Zwischengeschosse die minimalen Temperaturanforderungen zu fast jeder Zeit einhalten auch wenn die Bodenheizung kaum aktiv ist. Die Abwärme durch die darüber und darunter liegenden Wohnungen reicht aus. Bei einer Absenkung der Solltemperatur im Zwischengeschoss von 21 °C auf 18 °C führt dazu, dass gar keine Wärme mehr über die Bodenheizung eingebracht wird und der Komfort trotzdem eingehalten werden kann.

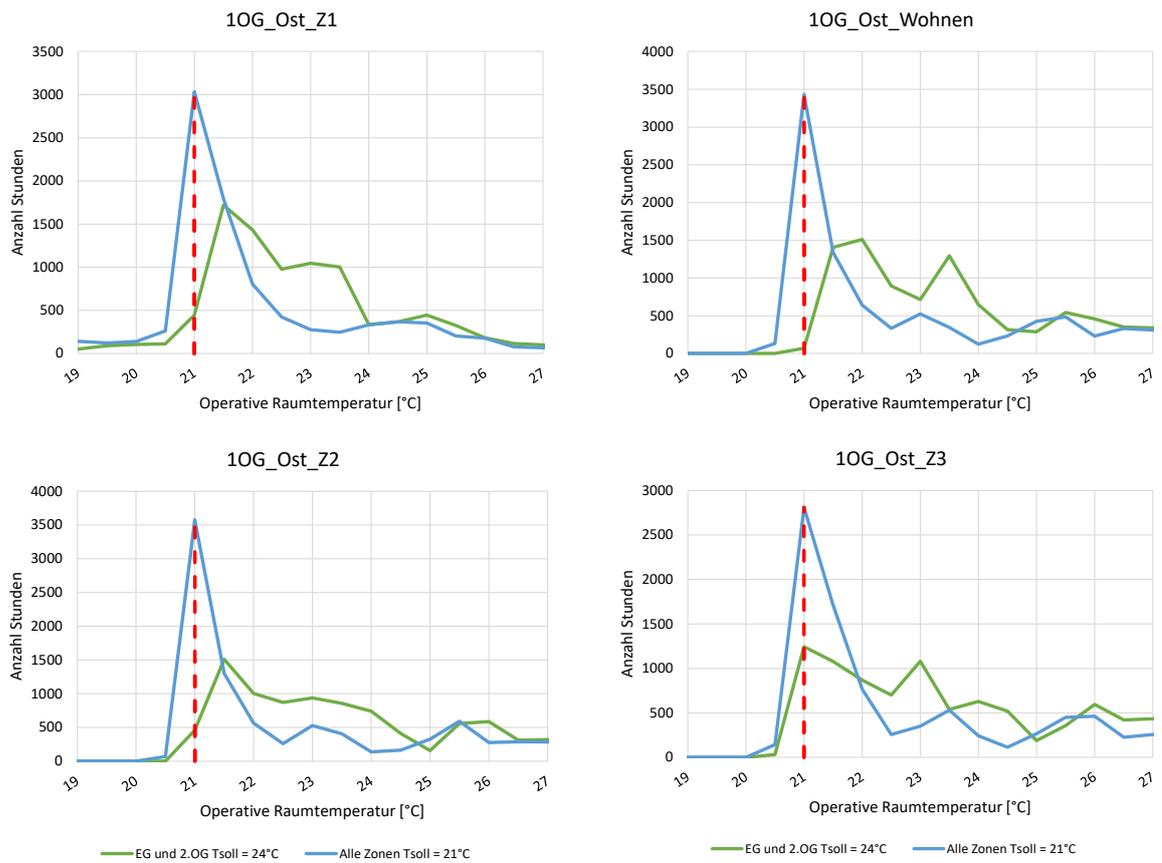


Abbildung 26: Vergleich der Temperaturfrequenz für Simulationen mit homogener und inhomogener Temperatureinstellungen in den Wohnungen mit Referenzraumregelung.

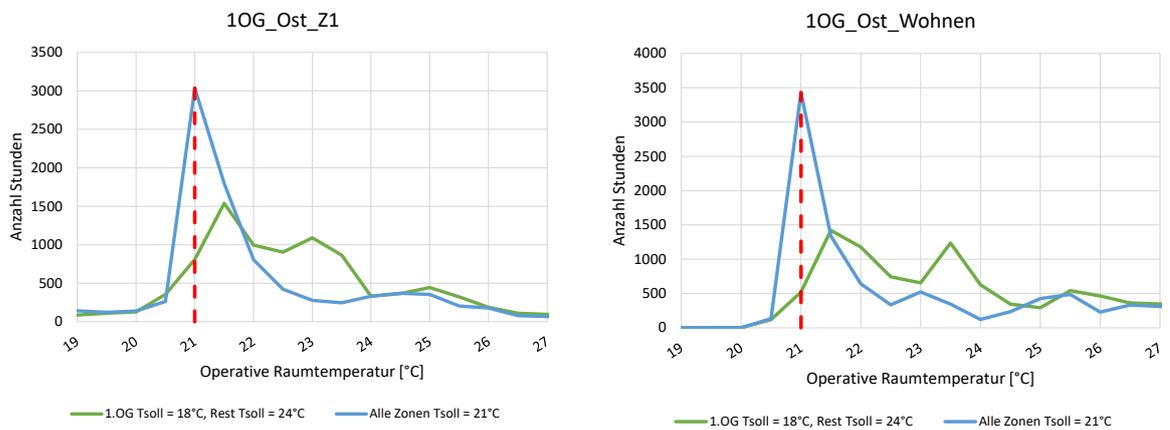


Abbildung 27: Vergleich der Temperaturfrequenz für Simulationen mit homogener Raumtemperatur über alle Zonen und Simulationen mit Raumsolltemperaturen von 18 °C im Zwischengeschoss.

5 Schlussfolgerung

Die Auswertung der Simulationen zeigt deutlich, dass Wohnbauten ohne Raumtemperaturregelung einen wesentlich grösseren Endenergieverbrauch aufweisen als mit Raumtemperaturregelung. In allen untersuchten Fällen ist der Verzicht auf eine Regelung nicht zu empfehlen. Der Komfort kann mit einer Einzelraumregelung am besten eingehalten werden. Die Energieeinsparungen die mit einer Einzelraumregelung gegenüber einem Verzicht auf Raumregelung erzielt werden, rechnen sich aus ökonomischer Sicht jedoch nicht. Anders ist dies bei einer Referenzraumregelung, diese ist dank den wesentlich tieferen Investitionskosten zu jederzeit wirtschaftlich, auch wenn die Energieeinsparungen tiefer sind als mit einer Einzelraumregelung.

Eine Schwierigkeit im Projekt war, dass Annahmen getroffen werden mussten für möglichst realistisches Verhalten der Benutzer bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen, da die wissenschaftlichen Grundlagen zum Benutzerverhalten weitgehend fehlen. Nichtsdestotrotz, können allgemeingültige Aussagen zum Endenergieverbrauch für die unterschiedlichen Regelungsarten gemacht werden und in einem wirtschaftlichen Kontext analysiert werden. Im Kapitel 8 sind die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Regelungsvarianten für ein Mehrfamilienhaus in einem Fact Sheet zusammengefasst. In Tabelle 9 ist eine qualitative Bewertung und Zusammenfassung der Resultate dargestellt.

Tabelle 9: Qualitative Bewertung der Einzelraumregelung und der Referenzraumregelung für unterschiedliche Simulationsbedingungen.

	Keine Raumregelung	Einzelraumregelung	Referenzraumregelung
Endenergieverbrauch			
Wirtschaftlichkeit	Vergleichsbasis		
WP Schaltzyklen (Kompressorlebensdauer)			
Temperaturabsenkung			
Komfort bei tiefen und homogenen Raumtemperaturen			
Komfort bei hohen und inhomogenen Raumtemperaturen			
Komfort bei geschlossenen Zimmertüren			

⁵ Die minimalen Temperaturen werden zu jederzeit eingehalten, jedoch wird die gewünschte Temperatur häufig überschritten. Wenn die Übertemperatur mit Fensterlüften korrigiert wird durch die Nutzenden, dann kann das auch als Komforteinbusse betrachtet werden.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Schwerpunkte der Untersuchung genauer eingegangen.

Homogene Raumtemperaturen in allen Zonen:

Simulationen mit Einzelraumregelung und homogenen Temperaturen in allen Zonen haben einen um 3'551 kWh (-41%) tieferen Endenergieverbrauch gegenüber der Simulation ohne Raumregelung. Der grosse Unterschied ist darauf zurück zu führen, dass ohne Raumregelung viel höhere Raumtemperaturen vorherrschen als eigentlich benötigt. Der sogenannte Selbstregel-Effekt reicht nicht aus um den Wärmeeintrag der Fussbodenheizung genügend zu reduzieren. Der Vergleich der Referenzraumregelung mit der Einzelraumregelung zeigt, dass die Referenzraumregelung mindestens einen elektrischen Mehrbedarf von 931 kWh (+10%) gegenüber der Einzelraumregelung aufweist. Die gewünschten Temperaturen werden durch den Einsatz von Einzelraumregulierungen am besten eingehalten: weder gibt es viele Stunden an denen die Solltemperatur mehr als 0.5 °C unterschritten wird, noch wird die Solltemperatur stark überschritten. Es stellt sich die Frage, wie der Nutzer der Wohnung reagiert, wenn wie im Fall ohne Raumregelung die Temperatursollwerte zum Teil deutlich überschritten werden. Im schlimmsten Fall öffnet der Nutzer die Fenster um die Übertemperatur zu korrigieren, was dazu führt, dass der Energiebedarf deutlich über das ansteigt was in dieser Arbeit simuliert wurde.

Erhöhte und inhomogene Raumtemperaturen

Betrachtet man den Fall, dass im Erdgeschoss und im obersten Geschoss eher höhere Temperaturen verlangt werden als im Zwischengeschoss, so reduziert sich die Differenz zwischen Einzel- und Referenzraumregelung auf 538 kWh. Jedoch erfüllt die Einzelraumregelung die Komfortansprüche (Temperaturverteilung) besser. Da auf Grund der höheren Temperaturansprüche auch die Vorlauftemperatur höher ausfällt, steigt der elektrische Mehrverbrauch im Fall ohne Raumregelung auf 4'088 kWh (+33%) gegenüber der Einzelraumregelung. Ohne Raumregelung werden zum Teil viel zu hohe Raumtemperaturen erreicht, was nicht überraschend ist auf Grund der Erhöhung der Vorlauftemperatur. Damit wird deutlich, dass ein Verzicht auf eine Raumregelung nicht zu empfehlen ist, da im Betrieb eines Gebäudes kaum garantiert werden kann, dass die Vorlauftemperatur nicht erhöht wird auf Grund von Beschwerden von einzelnen Bewohnern. Bei einer Erhöhung der Vorlauftemperatur werden in allen Zonen höhere Raumtemperaturen erreicht, unabhängig davon ob dies von allen Bewohner so gewünscht wird.

Berücksichtigt man bei der Auswertung unterschiedliche Verschattungsmethoden wird die Differenz zwischen den Fällen mit und ohne Raumregelung noch grösser. Es konnte jedoch kein relevanter Unterschied zwischen den beiden Varianten mit Raumregelung festgestellt werden.

Temperaturabsenkung in einzelnen Zonen

Mit dieser Studie kann aufgezeigt werden, dass auch in einem modernen Mehrfamilienhaus in einer Wohnung mit Einzelraumregelung unterschiedliche Zimmertemperaturen erreicht werden können. Einzelne Zimmer können höhere oder auch tiefere operative Temperaturen aufweisen als zum Beispiel das Wohnzimmer. Räume die einen grossen Anteil an Aussenwänden haben oder einen grossen Fensteranteil, können im Schnitt bis zu 1.5 K abgesenkt werden. An einem konkreten Beispiel zeigt sich, dass diese Temperaturunterschiede in den Räumen, Einsparungen von ca. 1'413 kWh an Endenergie möglich machen im Vergleich zu einer Referenzraumregelung, bei welcher die eingestellte Solltemperatur der Zone entspricht in welcher die höchsten Anforderungen vorherrschen. Der Nutzen einer Einzelraumregelung ist für Fälle mit unterschiedlichen Raumtemperaturen sehr schwierig abzuschätzen, da nicht bekannt ist ob dies von den Bewohnern aktiv gewünscht wird und inwiefern zum Beispiel Türen aktiv genutzt werden. Die Simulationen zeigen, dass bei geschlossenen Türen noch ein viel grösserer Einspareffekt erreicht werden kann, da die gewünschten Solltemperaturen häufiger und mit geringer Abweichung erreicht werden. Auffällig ist, dass im Fall der Referenzraumregelung in einigen Zonen der Komfort nicht eingehalten werden kann, wenn die Türen geschlossen sind. Es sind vor allem Räume die einen grossen Fensteranteil oder viele Aussenwände aufweisen. Dies macht deutlich, dass die Wahl des Referenzraumes einen wichtigen Einfluss auf den Energieverbrauch haben kann. Denn dies kann dazu führen, dass der Nutzer die Solltemperatur wegen einem Zimmer erhöht und somit in der gesamten Wohnung die Raumtemperaturen steigen. Es stellt sich die Frage, ob in der Praxis die Wahl des Referenzraumes genügend Aufmerksamkeit geschenkt wird und nicht generell das Wohnzimmer immer als Referenzraum genutzt wird.

In dieser Studie wurde nicht untersucht, wie die optimale Wahl der Raumtemperaturregelung von der Art der Gebäudelüftung abhängt. Eine reine Fensterlüftung wurde nicht untersucht, da entsprechende Daten zum Benutzerverhalten nicht verfügbar waren.

Wärmefluss zwischen den Zonen

Während der Auswertung der Resultate ist aufgefallen, dass sowohl der Wärmebedarf als auch die Temperaturen im Zwischengeschoss stark beeinflusst werden durch die Wohnungen oberhalb und unterhalb. Wenn alle Wohnungen und Stockwerke die gleiche Raumsolltemperatur aufweisen, dann beträgt der Anteil am Gesamtwärmebedarf im Zwischengeschoss 20%. Werden jedoch das Geschoss darunter und darüber mit 3 K höheren Solltemperaturen beheizt, sinkt der Wärmebedarfsanteil auf 1% für das Zwischengeschoss. Dies führt dazu, dass die Temperaturen im Zwischengeschoss zum Teil höher sind als die Bewohner dies eigentlich wünschen, was zur Folge haben kann, dass diese ihre Raumsolltemperatur weiter senken oder gar die Fenster öffnen. Was schlussendlich eine Ursache für den sogenannten „Energy Performance Gap“ sein kann. Dies wird in einer Studie aus Deutschland [18] als „Bio-Feedback“ bezeichnet. Aus eigener Erfahrung, aber auch aus Gesprächen mit Arbeitskollegen/innen, wurde die Thematik der zu warmen Zwischengeschosse schon häufig besprochen und die Ergebnisse stimmen weitgehend überein mit den

Resultaten der Simulationen. Die Resultate zeigen, dass die „Nullheizsolltemperatur“ im Zwischengeschoss bei ca. 20 °C liegt, was bedeutet, dass das Zwischengeschoss bei dieser Solltemperatur ausreichend über die Wohnungen unter- und oberhalb beheizt wird.

Einfluss auf das Heizungssystem

Im Gegensatz zu den vorangehenden Studien, bei denen ein Einfamilienhaus untersucht wurde, hat die Wahl der Raumtemperaturregelung einen geringen Einfluss auf das Heizungssystem. Hier dient der Pufferspeicher als hydraulische Weiche und entkoppelt den Heizkreis vom Wärmepumpenkreis. Im Extremfall weist die Simulation mit Referenzraumregelung 1'079 (-37%) Einschaltzyklen weniger auf als die Simulation mit Einzelraumregelung welche gesamthaft 2'029 Einschaltzyklen aufweist. Am geringsten sind diese im Fall ohne Raumregelung. Hier muss die Wärmepumpe am wenigsten häufig starten und hat damit die geringsten Anfahrverluste (804 Starts). Welchen Einfluss die Einschaltzyklen auf den Stromverbrauch oder die Lebensdauer der Wärmepumpe haben, konnte mit den zur Verfügung stehenden Modellen nicht ermittelt werden. Wenn eine drehzahlgeregelte oder eine mehrstufige Wärmepumpe zum Einsatz kommt, kann davon ausgegangen werden, dass die Differenz der Einschaltzyklen zwischen den Regelungsarten gering ist.

Wirtschaftlichkeit

Aus energetischer Sicht schneidet in allen Fällen die Einzelraumregelung am besten ab (30–40% Einsparung gegenüber keiner Regelung, 4–13% Einsparung gegenüber Referenzraumregelung). Berücksichtigt man jedoch auch die wirtschaftlichen Aspekte, so ist die Wahl der Regelungsvariante nicht mehr eindeutig. Unter der Annahme, dass der Strompreis ausgehend von 20.5 Rp/kWh jedes Jahr um ein Prozent steigt, können die Investitionskosten einer Einzelraumregelung mit den Einsparungen an elektrischer Energie nicht amortisiert werden. Die Referenzraumregelung ist hingegen auf Grund der deutlich tieferen Investitionskosten wirtschaftlich. Natürlich haben die gewählten Parameter wie Kapitalzinssatz und Lebensdauer einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Deshalb sind diese Resultate mit Vorsicht zu betrachten und dienen vor allem als Indikatoren.

Auf Basis der hier präsentierten Simulationsergebnisse und der Annahme eines Zinssatzes von 3%, mittleren Stromkosten von 22 Rp/kWh und einer Lebensdauer von 15 Jahren wäre eine Einzelraumregelung wirtschaftlich gegenüber keiner Raumregelung, wenn die Investitionskosten pro Raum unter 380 CHF zu stehen kommen. Gegenüber einer Referenzraumregelung beginnt die Wirtschaftlichkeit erst bei Kosten von unter 240 CHF pro Raum. In jedem Falle ist jedoch die Einzelraumregelung mit einem deutlichen Komfortgewinn (exakteres Einhalten der Soll-Temperaturen) verbunden, dies sowohl gegenüber keiner Regelung, als auch gegenüber einer Referenzraumregelung.

6 Empfehlungen

Aus Sicht der Autoren reicht der sogenannte Selbstregel-Effekt nicht aus um den Komfort und einen tiefen Energieverbrauch bei Wohngebäuden ohne zusätzliche Regelung zu gewährleisten. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Gebäude nicht im Optimum betrieben wird bezüglich Vorlauftemperatur und Heizgrenze ist hoch, und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch und das Verfehlen der individuell gewünschten Solltemperaturen sind gross. Dies zeigen unterschiedliche Studien zum Thema Performance Gap. Auch nicht-technische Aspekte wie zum Beispiel das Bedürfnis der Nutzer, Einfluss auf die Heizung, respektive auf die Raumtemperaturen, zu nehmen, sollte berücksichtigt werden.

Berücksichtigt man nur die Wirtschaftlichkeit und die zum Teil geringen energetischen Unterschiede zwischen der Referenzraum- und Einzelraumregelung, so könnte aus Sicht der Autoren die Verwendung von Referenzraumregelungen auch bei höheren Vorlauftemperatur für neue Mehrfamilienhäuser mit einer Fussbodenheizung ausreichend sein. Nicht berücksichtigt ist dabei jedoch der Komfortgewinn durch die Einzelraumregelung (unterschiedliche Raumtemperaturen). Die Autoren empfehlen eine Weiterentwicklung im Bereich der Einzelraumregelung, die dazu führt, dass die Kosten pro Regelkreis deutlich reduziert werden (ca. 50%, max. CHF 380 pro Regelkreis installiert), womit diese Systeme auch wirtschaftlich vorteilhaft werden. Da der grösste Kostentreiber die Installation und die Verkabelung der Thermostatregler ist, könnten (energieautarke) Funklösungen eine wirtschaftliche Alternative darstellen.

Bei Einfamilienhäusern ist eine Einzelraumregelung immer vorzuziehen, da die Möglichkeit einzelne Räume abzusenken ein wesentlicher Vorteil sein kann (demographische Entwicklung, Auszug der Kinder etc.). Häufig sind Einfamilienhäuser zweistöckig ausgeführt, was die Regelung über nur einen Referenzraum schwierig macht.

Nicht ganz überraschend sind die Resultate zum Wärmetransfer zwischen den Wohnungen in Anbetracht der heutigen, immer besseren Gebäudehüllen. Hier stellt sich die Frage, ob eine bessere Dämmung zwischen den Geschossen nicht sinnvoll wäre, da auf Grund der Gefahr häufiger Fensteröffnung in einem unerwünscht warmen Zwischengeschoss der Heizwärmeverbrauch für das gesamte Gebäude ansteigt (Stichwort: Bio-Feedback [18]). Zumindest bei der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung (VHKA) sollte berücksichtigt werden, dass einzelne Wohnungen die tiefere Raumsolltemperaturen als die Umliegenden aufweisen, kaum noch Wärme benötigen auf Grund der Wärmeeinträge über die Zwischendecken. Mit der MuKE 2014 wird dieser Umstand noch verschärft, da für Neubauten die Pflicht für eine VHKA entfällt und damit auch der energetisch begründete maximale U-Wert von $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ zwischen den Nutzeneinheiten (in der Regel Wohnungen) nicht mehr eingehalten werden muss. Eine Dämmung wird aber aus Schallschutzgründen „immer“ notwendig sein (typischerweise 4 cm, was etwa einem U-Wert von $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ergibt).

7 Ausblick

Die Ergebnisse aus diesem Projekt fliessen in unterschiedliche Gremien ein. Durch die Teilnahme des AWEL Zürich in der Fachexpertengruppe ist der Zugang zu den entsprechenden kantonalen Behörden gewährleistet. Weiter sind die Autoren aktiv in SIA Kommissionen tätig (z.B.: SIA 380). Damit fliessen die neusten Forschungsergebnisse direkt in die Normenkommission und können bei anstehenden Normenrevisionen diskutiert und berücksichtigt werden.

Auf Grund der engen Zusammenarbeit mit dem AHB Zürich (Fachexpertengruppe) fliessen die Informationen auch an grosse Bauherren wie die Stadt Zürich. Das Projektteam steht zudem in engem Kontakt mit Herstellern von Raumregelungseinheiten wie der Belimo AG.

Die Resultate werden am Brenet Statusseminar 2020 und an der Klima 2019 in Bukarest präsentiert. Weiter sind Beiträge in verschiedenen Haustechnik Magazinen vorgesehen.

8 Fact Sheet in Bezug auf MFH

	Einsparung an Endenergie (Referenzhaus)	Vorteile	Nachteile
Keine Raumregelung „Selbstregeleffekt“	0 kWh	<ul style="list-style-type: none"> • Raumtemperaturen werden zu jederzeit erreicht oder übertroffen • Keine Investitionskosten • Low-Tech 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoher Endenergiebedarf • Zum Teil zu hohe Raumtemperaturen (auf Grund ungenügender Reduktion des Wärmeeintrages) • Sehr anfällig auf fehlerhafte Heizungseinstellungen • Kein Eingriff durch Nutzer möglich
Einzelraumregelung	-3'551 kWh (-2.9 kWh/m ² a) (-29%)*	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefster Endenergieverbrauch • Komfort wird am besten eingehalten • Individuelle Raumtemperatureinstellung (Absenkung und Erhöhung möglich) • Robust gegen fehlerhafte Heizungseinstellungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Investitionskosten • Wird bei heutigen Investitionskosten und Energiepreisen nicht amortisiert über die Lebensdauer (nicht wirtschaftlich) • Hohe WP Einschaltzyklen
Referenzraumregelung	-2'620 kWh (-2.2 kWh/m ² a) (-22%)*	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis • Wirtschaftlich • Einfache Ausführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturen werden nicht in jeder Zone zufriedenstellend erreicht • Nur geringer Eingriff durch Nutzer möglich • Richtige Wahl des Referenzraumes schwierig in der Praxis

* im Vergleich zum Fall „Keine Raumregelung“

9 Literaturverzeichnis

- [1] „SIA 384/1:2009: Heizungsanlagen in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
- [2] I. Mojic, „Einfluss von raumbasierten Regelungen auf den Raumwärmebedarf eines Einfamilienhauses mit Niedertemperatur-Verteilssystem“. Hochschule Luzern - Technik & Architektur, 13-Feb-2017.
- [3] „Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n 2014)“. Konferenz kantonaler Energiedirektoren, 09-Jan-2016.
- [4] I. Mojic und M. Haller, „Einfluss der Einzelraumregelung auf den Raumwärmebedarf von Niedrigenergiehäusern mit hohem Verglasungsanteil“. SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 13-Feb-2017.
- [5] H. R. Gabathuler, „Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen - Teil 1: STASCH-Planungshilfen“. Bundesamt für Energie, BFE - Schlussbericht, 2002.
- [6] M. Erb, P. Hubacher, und M. Ehrbar, „Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996 – 2003“, Bern, 2004.
- [7] M. Y. Haller *u. a.*, „Solar and Heat Pump Systems – Summary of Simulation Results of the IEA SHC Task 44/HPP Annex 38“, in *Proc. of the 11th IEA Heat Pump Conference*, Montreal, Canada, 2014.
- [8] I. Mojic, M. Luzzatto, M. Haller, M. Lehmann, M. Benz, und S. Van Velsen, „ImmoGap - Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser“. SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 31-Aug-2018.
- [9] „SIA 380/1:2009: Thermische Energie im Hochbau“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
- [10] „SIA Merkblatt 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik.“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2006.
- [11] „SIA 180: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden.“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.
- [12] „SIA 384.201: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2003.
- [13] „SIA 385/2:2015: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [14] „SIA Merkblatt 2023: Lüftung in Wohnbauten“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2008.
- [15] European Committee for Standardization (CEN), „EN 15377-1: Heating systems in buildings – Design of embedded water based surface heating and cooling systems – Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity“. Brüssel-2005.
- [16] A. Enseling, „Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand“. IWU - Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Sep-2003.
- [17] Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, „Konstante Strompreise 2019 - Medienmitteilung ElCom“. 07-Sep-2018.

- [18] F. Schröder, C. Ohlwärter, H. Erhorn, und J. Reiss, „Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern – Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen“, *EnEV aktuell*, Bd. Nr. 2, S. 17–19, 2010.

Anhang A: Referenzgebäude MFH

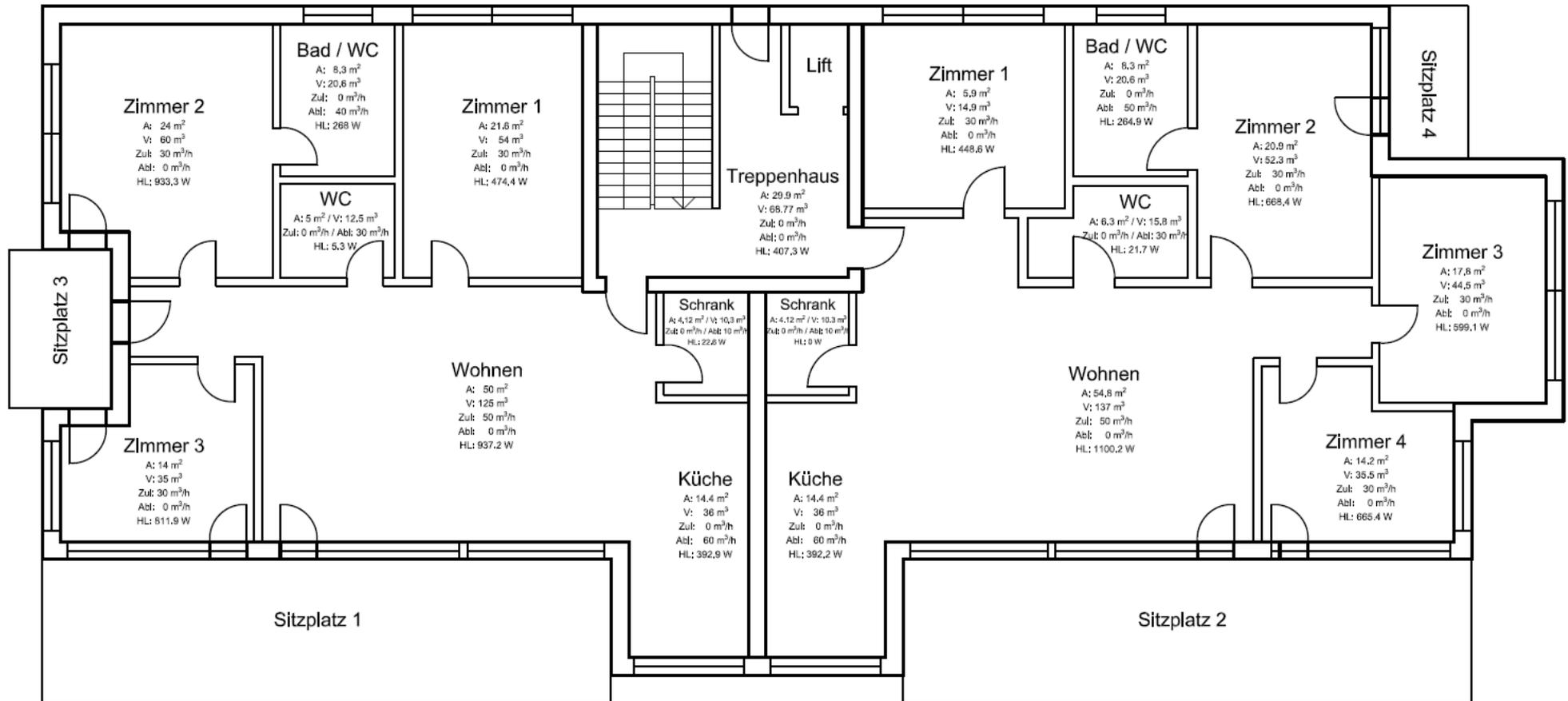


Abbildung 28: Grundriss des Erdgeschoss mit Heizleistung nach SIA 384.201.

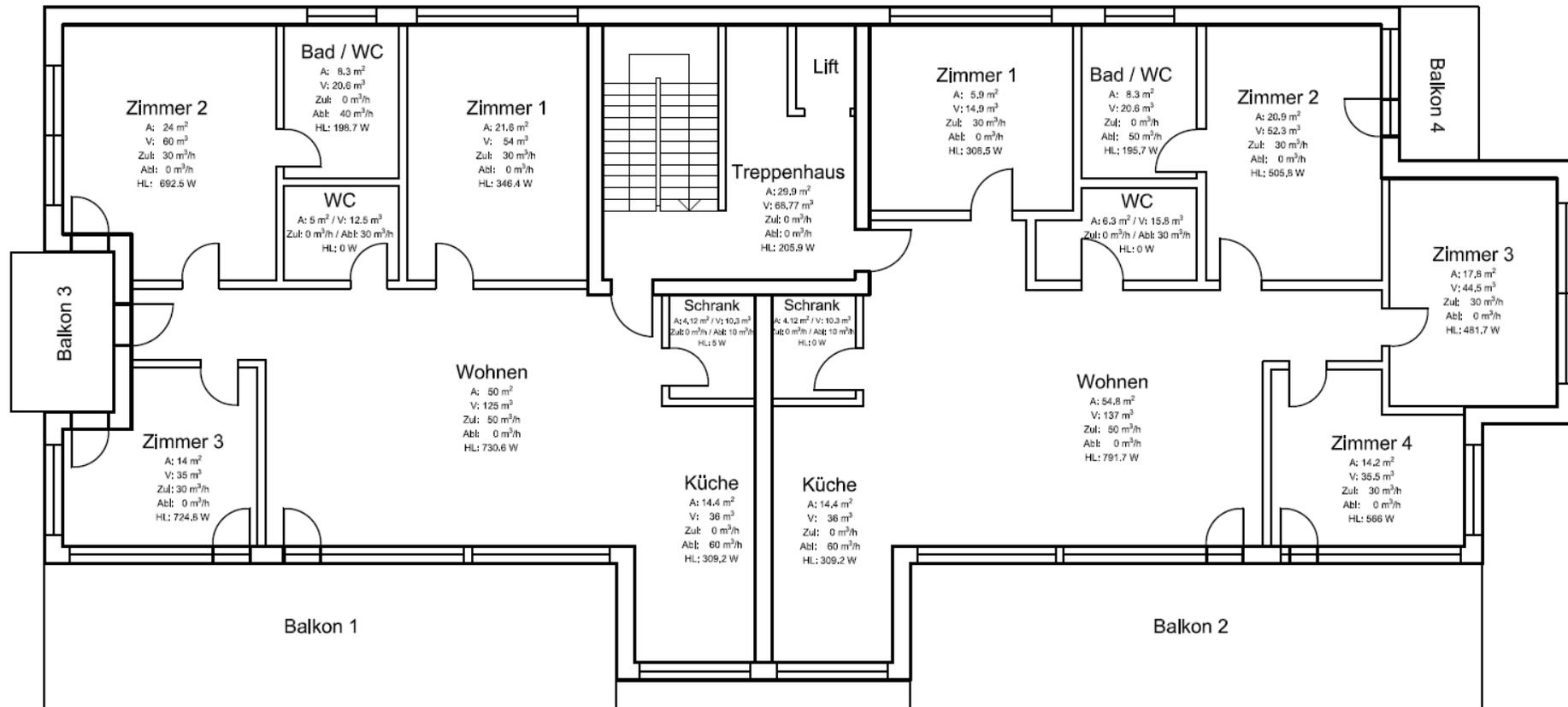


Abbildung 29: Grundriss des Zwischengeschosses mit Heizleistung nach SIA 384.201.

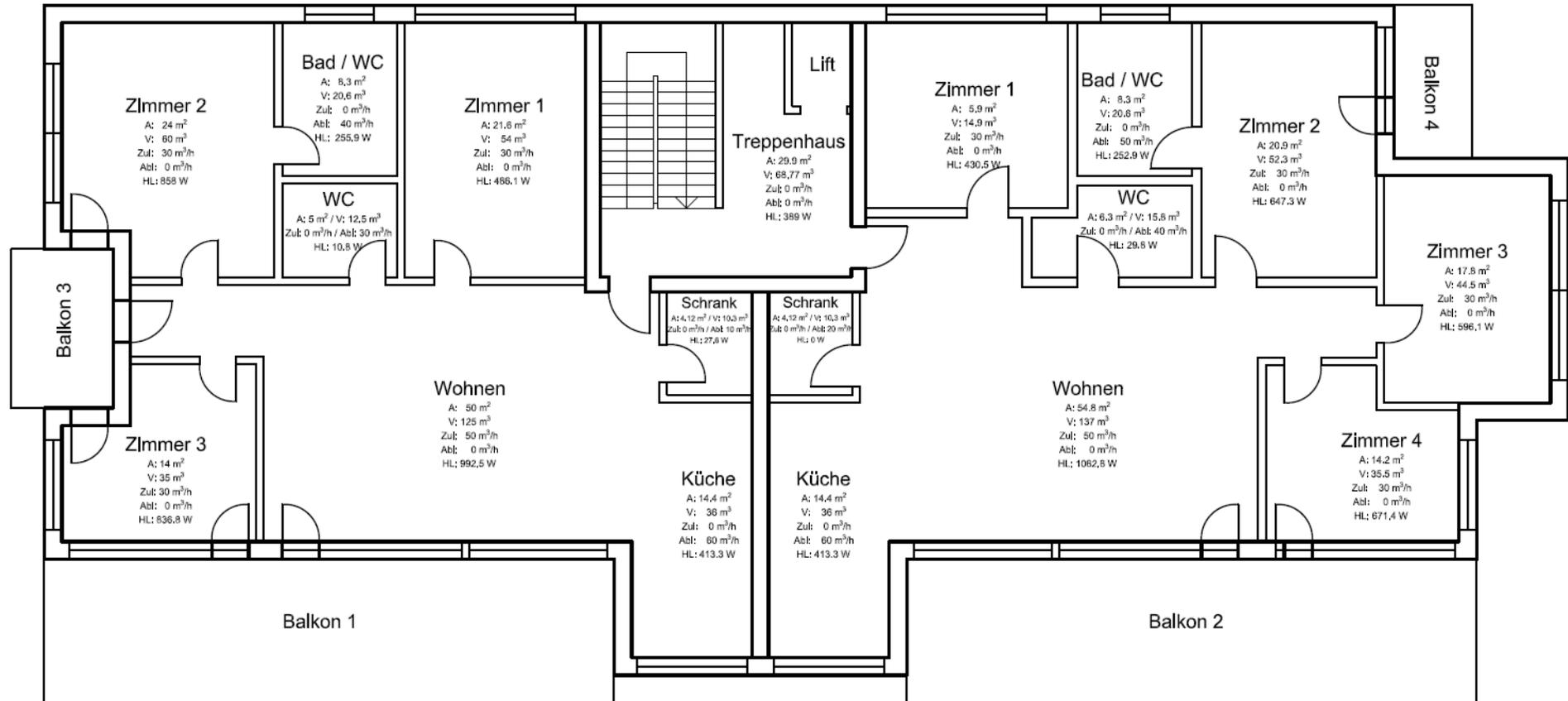


Abbildung 30: Grundriss des Obergeschosses mit Heizleistung nach SIA 384.201.

Anhang B: Weiterführende Resultate zu Kapitel 4.1.1

In den nachfolgenden Abbildungen sind für eine ausgewählte Winterperiode (Januar) die Raumtemperaturen für das Zimmer 3 und das Wohnzimmer im ersten Obergeschoss in der Wohnung West dargestellt. In Abbildung 31 wird deutlich, dass die gewünschten Raumtemperaturen im Zimmer 3 nicht eingehalten werden können bei der Verwendung einer Referenzraumregelung. Auf Grund der höheren Wärmeverluste im Zimmer 3 stellen sich tiefere Raumtemperaturen ein als im Wohnzimmer. Damit wird deutlich, dass hier das Wohnzimmer kein idealer Referenzraum ist, da er eine konstant höhere Temperatur aufweist. In der Realität würden die Nutzenden der Wohnung den Sollwert auf Grund eines Zimmers erhöhen, was dazu führt, dass in allen Räumen die Temperaturen ansteigen, auch wenn diese schon dem Komfortanspruch genügen würden (siehe Abbildung 32).

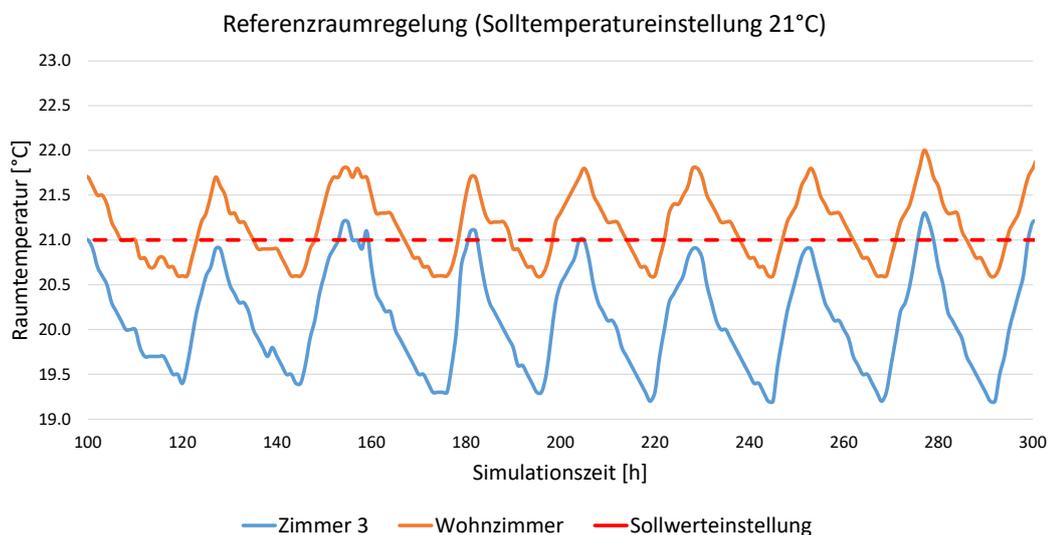


Abbildung 31: Temperaturverlauf vom Zimmer 3 und dem Wohnzimmer im 1.OG West mit einer Referenzraumregelung.

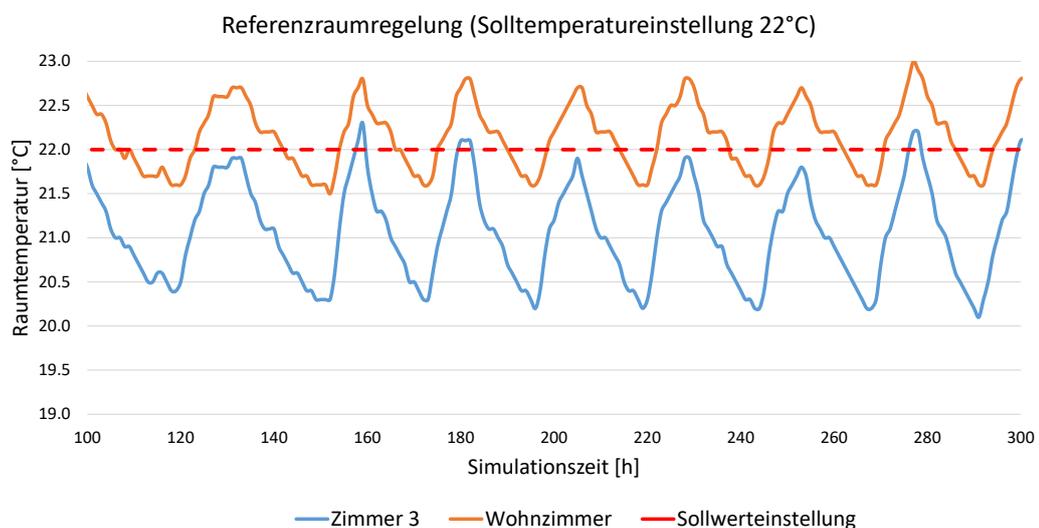


Abbildung 32: Temperaturverlauf vom Zimmer 3 und dem Wohnzimmer im 1.OG West mit einer Referenzraumregelung und um 1 K erhöhter Solltemperatur.

Betrachtet man die gleiche Situation im Fall der Einzelraumregelung (siehe Abbildung 33), dann kann man erkennen, dass für beide Räume die Komfortansprüche erreicht werden, da der Massenstrom und damit der Wärmeeintrag individuell dem Bedarf angepasst wird.

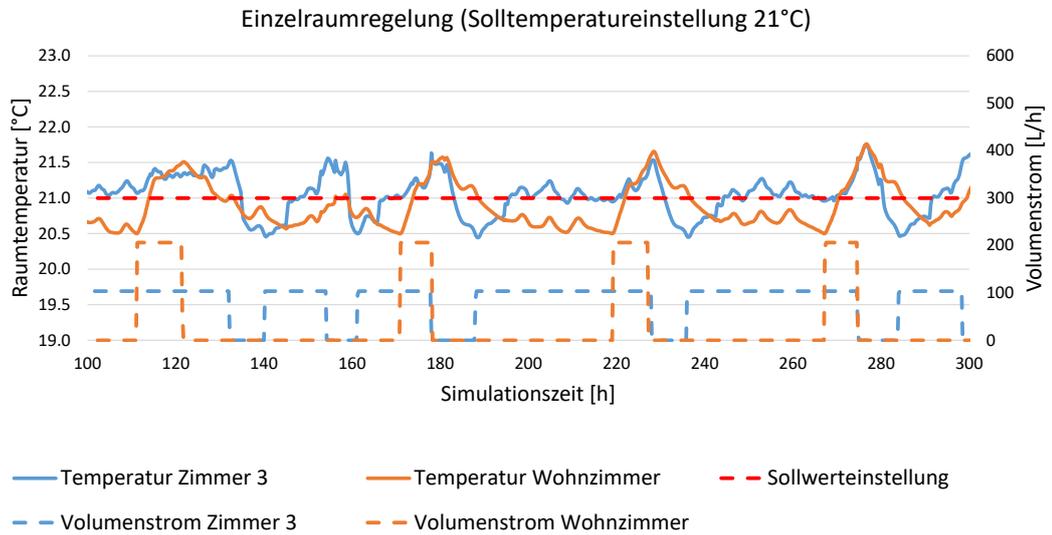


Abbildung 33: Temperaturverlauf und Volumenstrom von Zimmer 3 und dem Wohnzimmer im 1.OG West mit einer Einzelraumregelung.