

SüdSan

Sozialverträgliche und klimazielfunktionale Sanierung zweier Mehrfamilienhäuser als Modell für die Sanierung der Südtiroler-Siedlung Bludenz

Themendokumentation

**Simulation, Realisierung und Monitoring
einer nachträglichen Bauteilaktivierung
als minimalinvasives Wärmeabgabesystem
in der Sanierung**

**Simulation, Realisierung und Monitoring einer nachträglichen Bauteilaktivierung
als minimalinvasives Wärmeabgabesystem in der Sanierung**

Dornbirn / Gleisdorf, März 2024

Dr. Tobias Hatt, Energieinstitut Vorarlberg

Thomas Ramschak, AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf, Austria

Herausgeber:

Energieinstitut Vorarlberg, Fachbereich Energieeffizientes Bauen

CAMPUS V, Stadtstraße 33

6850 Dornbirn, Österreich

Tel. +43 (0)5572 / 31 202-0

info@energieinstitut.at

Zusammenfassung

Die in den 50er Jahren errichteten Mehrfamilienhäuser der erhaltenswerten Südtiroler-Siedlung in Bludenz sind bezüglich Bausubstanz und Wärmeversorgung weitestgehend im Originalzustand. Die Wohnungen werden mit Einzelraumlösungen beheizt. Sie weisen hohe Energieverbräuche und deutliche Komfortdefizite auf.

Im Jahr 2023 wurden zwei Pilotgebäude der Siedlung in hoher thermischer Qualität und in bewohntem Zustand saniert (FFG Projekt SüdSan). Da die Gebäude kein hydraulisches Wärmeabgabesystem besaßen, wurden hierfür unterschiedliche Wärmepumpen-geeignete Lösungen konzipiert und mit Hilfe dynamischer Gebäude- und Anlagensimulation untersucht. Varianten waren Niedertemperaturheizkörper sowie die thermische Aktivierung der Außenwände. Letztere erfolgt durch ein Flächenheizsystem auf der Außenseite der Bestandswände, welches mit einer Dämmfassade überdeckt wird.

Damit der Wärmeübergang vom Heizmedium in den Raum korrekt abgebildet wird, wurde das eindimensionale Wandmodell der Gebäudesimulation mit Co-Berechnungen des zweidimensionalen Wärmeflusses kalibriert. Des Weiteren wurden in Parameterstudien verschiedene Regelstrategien und Konfigurationen untersucht.

Hauptvorteile der aktivierten Außenwand sind die minimalinvasive Installation im bewohnten Zustand und die Möglichkeit zu kühlen. Nachteile sind gemäß der Simulation ein $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ höherer Endenergiebedarf für die Beheizung, die anspruchsvollere Regelbarkeit aufgrund der Trägheit des Systems und höhere Investitionskosten. Durch die niedrigen Vorlauftemperaturen haben Niedertemperaturheizkörper wiederum nicht, wie gewohnt, hohe Oberflächentemperaturen, was zu niedrigerer Nutzerakzeptanz führen kann. Niedertemperaturheizkörper sind allerdings bekannte Lösungen, was Bauablauf und Koordination vereinfacht.

In den zwei Gebäuden wurde je ein System umgesetzt und ab Spätwinter 2024 messtechnisch begleitet.

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Ausgangslage	5
2 Simulationsstudie zur nachträglichen Bauteilaktivierung	6
2.1 Simulationsmodell	7
2.2 Wärmeübergang Heizfluid zur Wand	8
2.3 Wärmeabgabe an den Raum	11
2.4 Regelung	12
2.5 Vergleich mit Niedertemperaturheizkörpern.....	14
2.6 Umsetzung und Diskussion.....	15
3 Fazit und Ausblick.....	17
4 Literatur.....	18

1 Ausgangslage

Die erhaltenswerte Südtiroler Siedlung in Bludenz/Vorarlberg wurde zwischen 1940 und 1962 errichtet. Sie umfasst ca. 400 Wohnungen in kleinen Mehrfamilienhäusern mit durchschnittlich 6 bis 9 Parteien. Vor allem die in den Nachkriegsjahren errichteten Gebäude wurden in einem materialsparenden Niveau errichtet und sind baulich und bezüglich ihrer Wärmeversorgung weitestgehend im Originalzustand. Alle Wohnungen wurden mit Einzelraumlösungen beheizt, sei es mit Holz- oder Ölöfen oder direktelektrisch. Sie weisen hohe Energieverbräuche von 180-200 kWh/(m²_{WNFA}) und deutliche Komfortdefizite auf. In Abbildung 1 sind gemessene Temperaturen vor der Sanierung dargestellt. Man kann die Unterschiede zwischen den einzelnen Wohnungen abhängig von der Beheizungsart erkennen. Grün beispielsweise ein unregelmäßiger Stückholzofen (19-29°C), blau ein geregeltes direkt-elektrisches Heizsystem (22-23°C), rot ein nicht beheizter Raum (14°C).

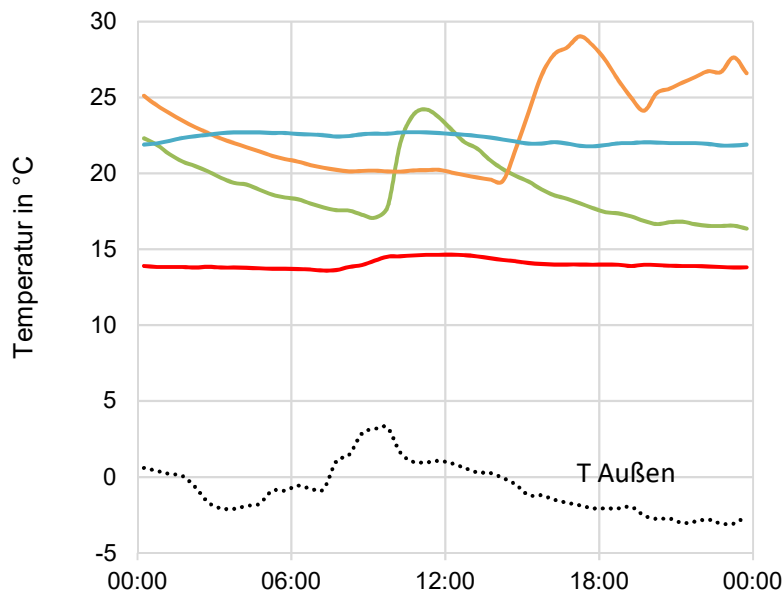


Abbildung 1: Gemessene Temperaturen vor der Sanierung (6.12.2022 in 4 Wohnräumen) Grün und grau: unregelmäßig z.B. Stückholzofen, blau geregelt z.B. direkt elektrisch, rot nicht beheizt.

Aufgrund des schlechten Zustands, des sehr hohen Energieverbrauchs und der unzureichenden thermischen Behaglichkeit ist eine Sanierung der zumeist 75 bis 80 Jahre alten Gebäude dringend notwendig, wenn die längerfristige Nutzbarkeit gewährleistet werden soll.

Im Jahr 2023 wurden im Rahmen des von der FFG geförderten österreichischen Forschungsprojekts SüdSan zwei Pilotgebäude der Siedlung in hoher thermischer Qualität saniert. Dazu gehörte die Dämmung der Gebäudehülle ($U_{\text{Dach+Wand}}=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), neue Fenster ($U_g=0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), Wärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitung (1 x Luft, 1 x Sole)

sowie eine Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung. Zusätzlich wurden die Dächer auf der Südseite vollständig mit Photovoltaik (PV) belegt.

2 Simulationsstudie zur nachträglichen Bauteilaktivierung

Da die Gebäude kein hydraulisches Wärmeabgabesystem besaßen, wurden verschiedene Wärmeabgabesysteme im Niedertemperaturbereich, die wärmepumpenoptimiert betrieben werden können, mit Hilfe dynamischer Gebäude- und Anlagensimulation in IDA ICE (EQUA, 2024) untersucht. Die Gebäude wurden im bewohnten Zustand saniert, weshalb die Installation der Wärmeabgabesysteme minimalinvasiv erfolgen sollte.

Mögliche Ausführungsvarianten waren Niedertemperaturheizkörper mit vertikaler Wärmeverteilung auf der Außenseite der Bestands-Außenwand, Deckenheizung sowie die nachträgliche thermische Aktivierung der Außenwände. Ausgeführt wurde die Variante mit Niedertemperaturheizkörpern (kleineres Gebäude) sowie die Variante mit wassergeführtem Flächenheizsystem (ähnlich Fußbodenheizung im Trockenbau) auf der Außenseite der Bestands-Außenwände, welche dann mit einer Dämmfassade (30 cm Dämmung, $U_{\text{Wand}}=0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) überdeckt werden (Abbildung 2).



Abbildung 2: Links: Schematischer Wandaufbau mit Bauteilaktivierung. Rechts: Ausführung am Pilotgebäude. Der Übergang vom Heizmedium an die Wand wird mit Wärmeleitblechen verbessert.

Solche Ansätze wurden zuvor in einigen Forschungsvorhaben untersucht und teilweise auch schon in der Praxis umgesetzt (Altgeld et al., 2010; Hackl et al., 2022; Hengel et al., 2020; Schmidt, 2019; Schweizer, 2021). In den meisten Vorhaben wurde die aktivierte Wand zur

Grundtemperierung eingesetzt, und zur individuellen Regelung sowie zum Erreichen der gewünschten Temperaturen ein Zusatzheizsystem verwendet. Die Temperaturen der aktiven Schicht können so niedrig gewählt werden, dass die Wand die Transmissionswärmeverluste verringert bzw. kompensiert oder so hoch, dass die Verluste überkompensiert werden, so dass eine aktive Beheizung des Raumes stattfindet.

Wie hoch die Auslegungstemperatur für den überkompensatorischen Betrieb sein muss, hängt unter anderem von der Heizlast, der Wärmeleitfähigkeit der Bestandswand, dem Wärmeübergang vom Fluid in die Wand, dem Wärmedurchlass der Dämmebene außerhalb der beheizten Schicht, der Regelung und dem Vorhandensein einer Zusatzheizung ab.

2.1 Simulationsmodell

Das Gebäude, ein Mehrfamilienhaus mit 9 Bestandswohnungen und zwei neuen Wohnungen im Dachgeschoß hat eine Energiebezugsfläche_{PHPP} von 648 m². Zur Beurteilung der Funktionalität, Behaglichkeit und Energieeffizienz wurden Simulationsstudien mit der Software IDA ICE V5 durchgeführt. Das Gebäude wurde raumweise zониert, die Belegung und interne Wärmequellen in Anlehnung an PHPP V10.5 (2023) angesetzt und die stündliche Auflösung nach SIA 2024 (2015) modelliert. Für die Jahressimulationen wurde ein Klimadatensatz in stündlicher Auflösung für den Standort mit der Software Meteororm V8 (2021) generiert

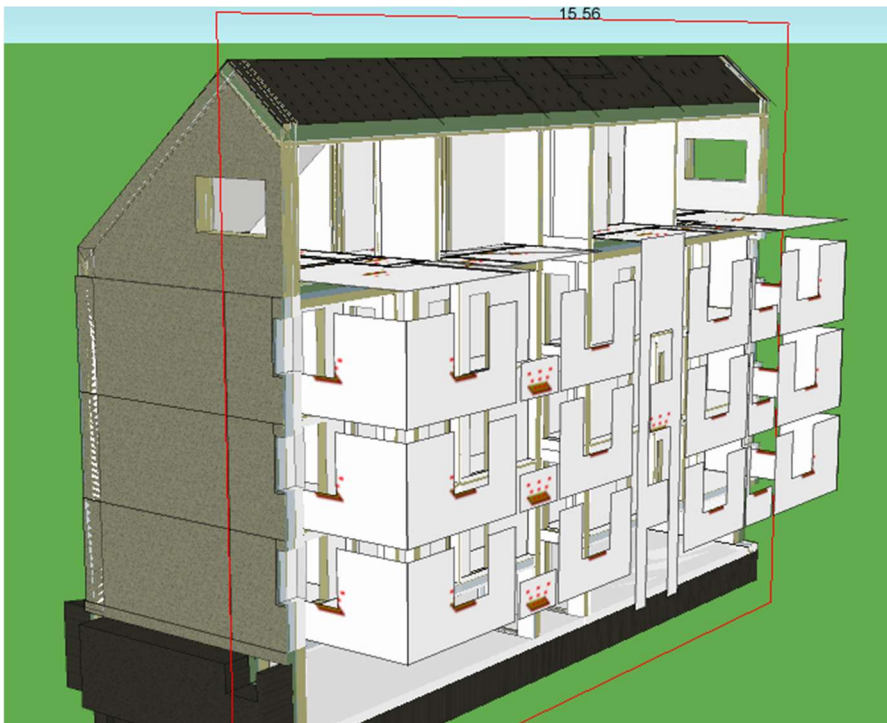


Abbildung 3: Darstellung der Geometrie der beheizten Layer (weiß) im Simulationsmodell. EG bis 2OG als aktivierte Außenwand, DG als Fußbodenheizung.

Das Wärmeabgabesystem wird als Flächenheizsystem im Modell abgebildet. Hierzu wird eine hydraulisch angebundene aktive Schicht im Wandmodell eingebracht. Das Wandmodell ist in 17 Teile diskretisiert, der aktive Layer liegt nach Teil 10 von innen. In Abbildung 3 ist der Layer der aktivierten Außenwand dargestellt. Für diesen Teil der Studie, mit Fokus auf das Wärmeabgabesystem, wurde die Wärmeerzeugung als vereinfachtes Modell einer Außenluft - Wärmepumpe (COP: 4,0 bei 7/45) abgebildet. Im Modell wurde eine Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung implementiert. Warmwasseranwendung, Haushaltsstrom und PV-Stromerzeugung wurden für diesen Teil der Studie nicht berücksichtigt.

Die Wärmeabgabeleistung der aktivierten Außenwand hängt von verschiedenen Parametern ab. Diese sind unter anderem die Größe der aktivierten Fläche, der U-Wert der Bestandswand, der Wärmeübergang vom Fluid in die Wand, Vorlauftemperatur, Durchfluss und Regelung. Damit diese Parameter bestimmt werden können, wurde eine Parameterstudie mit 2310 Varianten durchgeführt.

Modelllimitationen und Vereinfachungen:

- 1.) Das verwendete Wandmodell in IDA ICE ist ein eindimensionales Modell, welches keine Querverteilung (2D und 3D) abbildet. Dadurch können Verluste der aktivierten Außenwand z.B. über die Wand in den Keller/Erdreich mit dem Wandmodell nicht berechnet werden. Damit diese Verluste aber im Modell vereinfacht integriert sind, wird die Überdämmung der Heizfläche um 10% verschlechtert.
- 2.) Spülkästen, Badewannen und Vorsatzschalen in den Bädern werden als 1 cm EPS-Dämmung angenähert.
- 3.) Die Geometrie der Flächenheizelemente wird in der Software mit Innenmaßen modelliert. Somit ist die Fläche der Heizelemente in Realität um Wand- und Deckendicken größer. In der Umsetzung wurden Sperrbereiche um die Fenster und Wandecken zur Befestigung der Holzkonstruktion definiert. Die beiden Effekte gleichen sich geometrisch in etwa aus.

Die Annahmen in 1.) und 2.) wurden anhand dynamischer Wärmebrückenberechnungen des Projektpartners UIBK (Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen, (Magni, Ochs)) getroffen.

2.2 Wärmeübergang Heizfluid zur Wand

Damit der Wärmeübergang vom Heizmedium in den Raum korrekt abgebildet wird, wurde das eindimensionale Wandmodell der Gebäudesimulation mit einer zweidimensionalen Wärmeflussberechnung kalibriert. Diese Methodik ist ausführlich in Hengel et al., 2020 beschrieben.

Der Wandaufbau der Bestandswand hat bei der thermischen Aktivierung einen Einfluss auf die Heizleistung, da hierdurch die Wärmeleitung vom Heizmedium an den Innenraum beeinflusst wird. Die Heizleistung und der U-Wert weisen einen annähernd linearen Zusammenhang auf.

Der U-Wert wurde mit in situ-Messungen und 2D Wärmestromberechnungen bestimmt. Der gemessene U-Wert in Steinmitte (ohne Mörtelfuge) beträgt $1,58 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Messungen korrelieren mit den Rechenwerten, es wird von einem U-Wert von $1,7\text{-}1,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ausgegangen.

Nicht nur die Wärmeleitfähigkeit der Bestandswand beeinflusst die Wärmeabgabeleistung, sondern auch der Wärmeübergang vom Heizmedium zur Wand. Ein formschlüssig eingefasstes Rohr z.B. in einer Putzschicht weist analog zur Fußbodenheizung im Estrich einen guten Übergang auf, lose aufgelegte Rohre mit Luftspalt zur Bestandswand hingegen einen schlechten. Dieser Übergang wird in dem verwendeten eindimensionalen Wandmodell in der Simulation in IDA ICE nicht detailliert mit den verschiedenen Einflussgrößen abgebildet, sondern vereinfacht als heat transfer coefficient (HTC) beschrieben.

Der HTC beinhaltet folgendes:

- Verlegeabstand der Rohrleitungen
- Wärmeübergang vom Fluid zum Rohr
- Wärmedurchlasswiderstand des Rohres
- Wärmeübergangswiderstand vom Rohr zur nächsten Wandschicht.

Die Fassade sollte ursprünglich als fertiges Element inklusive der Wärmeabgabefläche installiert werden. Deshalb und wegen des Risikos des nachträglichen Anbohrens der Leitungen sowie höheren abgeschätzten Kosten wurden diese nicht eingeputzt.

Die Bestandswand des Pilotgebäudes ist mit einem groben Putz versehen. Dadurch konnten die Heizungsrohre nicht formschlüssig aufgebracht werden, wie dies z.B. bei einer glatten Stahlbetonwand möglich wäre. In den vorhergenannten Studien wurden nur glatte Wände mit kleinen Luftholräumen untersucht (Hengel et al., 2020). Deshalb wurde in einer Co-Berechnung für die grob verputzte Bestandswand der HTC-Wert ermittelt und nicht aus der Literatur übernommen. Mit 2D Wärmestromberechnungen (HTflux) für verschiedene Varianten wurde die Wärmeabgabe an der Wandinnenseite ermittelt. Ziel war es, den HTC-Wert für die Simulationen in IDA ICE zu ermitteln und die Notwendigkeit von Wärmeleitblechen zu untersuchen.

In einer Parameterstudie mit 100 Varianten in IDA ICE wurde für das Wandmodell der HTC-Wert von $0,5\text{-}35,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ variiert und die Wärmeabgabe an der Wandinnenseite ermittelt.

Diese Wärmeabgabe kann dann mit den 2D Wärmebrückenberechnungen abgeglichen und der HTC Wert der jeweiligen Lösung ermittelt werden.

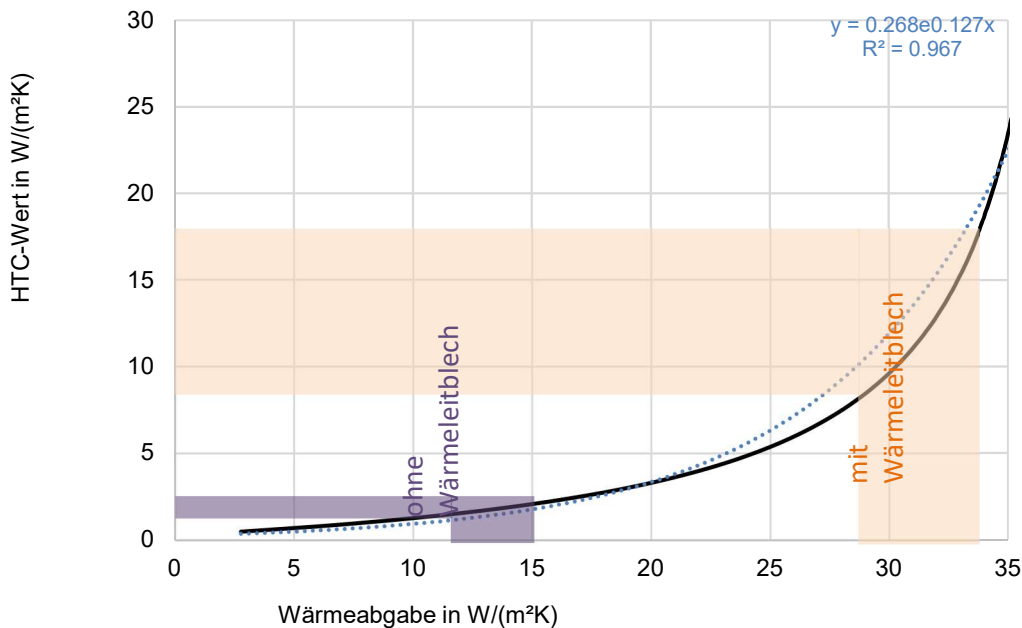


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen HTC-Wert und Wärmestrom an der Innenoberfläche der Außenwand. Grüner Bereich mit Wärmeleitblechen, Orange ohne. ($T_i=22^\circ\text{C}$, $T_a= -10^\circ\text{C}$, Mittlere Fluidtemperatur: $37,5^\circ\text{C}$ $U_{\text{Bestandswand}}=1,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen HTC-Wert und Wärmestrom an der Innenoberfläche der Außenwand. Der Zusammenhang lässt sich mit einer Exponentialfunktion annähern. Durch diesen exponentiellen Zusammenhang erkennt man, dass bei niedrigen HTC-Werten dieser Wert einen hohen Einfluss auf die Wärmeabgabeleistung des Systems hat. Bei einem HTC-Wert von $0,5 - 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ steigt die Abgabeleistung von 3 auf $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an. Im Intervall des HTC von $5 - 10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ steigt die Abgabeleistung nur noch von 25 auf $30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an. Bei dem weiteren HTC Bereich von $10 - 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, also $15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Unterschied statt vorher $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, steigt die Abgabeleistung nur noch von 30 auf $36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an. Dies zeigt, dass die Abgabeleistung mit Wärmeleitblechen nur unwesentlich geringer sein wird, als eine formschlüssige Lösung im Putzbett (HTC ca. $30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Diese Werte ordnen sich auch von der Größenordnung in die publizierten Werte (Hengel et al., 2020) ein.

Es zeigt sich, dass bei einer Montage ohne zusätzliche Wärmeleitbleche die Wärmeabgabe um den Faktor $2,5$ niedriger liegt. Für die umgesetzte Lösung, bei der eine formschlüssige Anbringung der Wärmeleitbleche vorausgesetzt werden kann, wird mit einem HTC-Wert von $18,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in den weiteren Simulationen gerechnet.

Wie hoch die benötigte Wärmeabgabeleistung der Wand sein muss, hängt von der Heizlast des Raumes und der zur Verfügung stehenden Wärmeabgabefläche (nächster Unterpunkt) ab.

2.3 Wärmeabgabe an den Raum

Bei einer Fußbodenheizung nimmt die Wärmeabgabefläche linear zur Raumgröße zu. Bei der Wandheizung hängt das Verhältnis von Wärmeabgabefläche (Außenwand) zur Raumgröße von verschiedenen Faktoren ab:

- Anzahl Außenwände (z.B. Eckräume)
- Raumgeometrie (z.B. schmal und lang)
- Raumhöhe
- Fensterflächenanteil

Bei Zwischengeschoßen ist die Größe der Wärmeabgabeflächen weniger kritisch, da Heizlast und Außenwandfläche meist korrelieren. Dachgeschoß und Erdgeschoss sind oft kritischer, da sie höhere Transmissionswärmeverluste aufweisen.

Im Fall des Eckraums (Abbildung 5 links) können somit unter den gegebenen Randbedingungen bei fast gleicher Außenwandfläche zu Fußbodenfläche etwa $25 \text{ W/m}^2_{\text{Boden}}$ eingebracht werden. Dieser Wert entspricht der Heizlast eines thermisch gut sanierten Gebäudes. Im Falle des schmalen Mittelraums (rechts) ist das Verhältnis Außenwandfläche/Fußbodenfläche nur etwa 0,4, wodurch nur etwa $10 \text{ W/m}^2_{\text{Boden}}$ eingebracht werden können. Dieser niedrige Wert entspricht einem Neubau in Passivhausstandard.

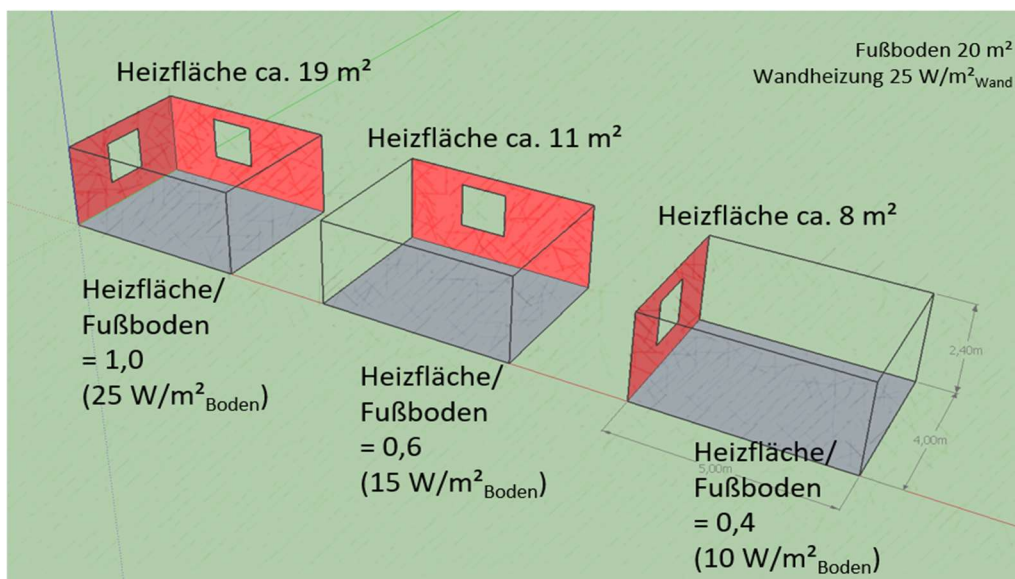


Abbildung 5: Wärmeabgabefläche der Wandheizung im Verhältnis zur Fußbodenfläche verschiedener Räume (4 x 5 m = 20 m²; Höhe 2.4 m, Abgabeleistung Wandheizung 25 W/m²_{Wand}).

Das bedeutet, dass Eckräume mit niedrigen Heizlasten (in zwischenliegenden Geschossen) ohne Wärmeleitbleche oder mit größeren Verlegeabständen ausgeführt werden könnten, alle anderen Zimmer, welche nur eine Außenwand haben, aber mit Wärmeleitblechen. In der Praxis wurden zur Vereinfachung des Bauablaufes alle Wände mit einem Verlegeabstand von 12,5 cm und Wärmeleitblechen ausgeführt.

Ein weiterer Punkt, welcher die Wärmeabgabe der aktivierten Außenwand an den Innenraum beeinflusst, sind bauliche Gegebenheiten oder Möblierung im Innenraum. Am Beispiel der Badezimmer in dem Pilotgebäude ist der sichtbare, bzw. zugängliche Teil der Außenwand, welcher ungehindert Wärme an den Innenraum abgeben kann, durch Spülkasten (Kaltwasser), Badewanne und Vorwand stark eingeschränkt. Auch große Einbauschränke behindern die Wärmeabgabe wesentlich. Die Transmissionswärmeverluste durch die Wand werden aber dennoch kompensiert und somit beispielsweise die Schimmelbildung an vorher kalten Wänden hinter Schränken reduziert.

2.4 Regelung

Es wurden im Vorfeld verschiedene Regelstrategien mithilfe von Gebäude- und Anlagensimulationen untersucht, wobei der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Regelung liegt. Die Strategien sind nachfolgend aufgelistet, sortiert nach zunehmender Komplexität und damit zunehmenden Kosten:

1. **Gesamtes Gebäude als ein Regelkreis:** Außentemperaturgeführt, Raumdifferenzierung über raumweise fix eingestellten Durchfluss und raumweise differenziertem Verlegeabstand.
2. **Gebäude in 4 Regelkreise unterteilt:** (OGs Nord-, OGs Süd, EG Nord, EG Süd), außentemperaturgeführt, Raumdifferenzierung über raumweise fix eingestellten Durchfluss und raumweise differenziertem Verlegeabstand.
3. **Einzelraumregelung:** Mit jeweils einem eigenen Heizkreis pro Raum (37 Heizkreise).
4. **Prädiktive Regelstrategien:** Diese werden derzeit in einer Masterarbeit an der Fachhochschule Vorarlberg untersucht (Roman Hörner, 2024). Ergebnisse liegen noch nicht vor.

Die nötige Vorlauftemperatur wird nahezu unabhängig der Regelungsart von den kritischen Räumen bestimmt und so ausgelegt, dass diese in der Heizphase konstant beheizt werden. Diese liegen nordseitig im Erdgeschoss neben dem Treppenhaus. Damit die Vorlauftemperatur gesenkt werden kann, werden in den zwei kritischen Räumen zur Spitzenlastabdeckung

zusätzlich direkt-elektrische Heizelemente vorgesehen, genauso in den Bädern (24°C Solltemperatur, geringe Außenwandfläche).

Die Ergebnisse der Simulationen der einzelnen Regelstrategien sind wie folgt:

- zu 1. Südräume und Zwischengeschoße weisen tendenziell höhere Temperaturen auf, da dort zwar weniger Leistung installiert ist, aber trotzdem oft keine Wärme benötigt wird, während die Nordräume noch beheizt werden müssen. Diese können bei dieser Regelungsart aber nicht getrennt geschaltet werden.
- zu 2. Temperaturunterschiede zwischen den Räumen (Nord-Süd) nehmen ab. Einzelne Räume wie Schlafzimmer können aber im Vergleich zur Einzelraumregelung nicht abgeschaltet werden.
- zu 3. Die Temperaturverteilung über das Gebäude vereinheitlicht sich. Einzelne Räume können abgeschaltet werden. Eine schwach schwankende Temperaturkurve wie bei Heizkörpern kann trotz Einzelraumreglern durch die Trägheit nicht erreicht werden. Robuster gegen Änderungen in der Nutzung (höhere oder niedrigere Solltemperaturen) als vorherige. Technisch aufwendiger und damit auch teurer.

Wie beschrieben, lag der Fokus dieses Projekts nicht auf den verschiedenen Regelstrategien. Es sollte aber eine Regelung umgesetzt werden, welche den bestmöglichen Nutzerkomfort bei diesem trägen System ermöglicht und auch flexibel angepasst werden kann. Deshalb wurde eine Einzelraumregelung umgesetzt, die in die zentrale Gebäudeleittechnik eingebunden ist. Durch diese hardwaremäßige Einbindung kann zu einem späteren Zeitpunkt auch eine prädiktive Regelung in der Software umgesetzt werden.

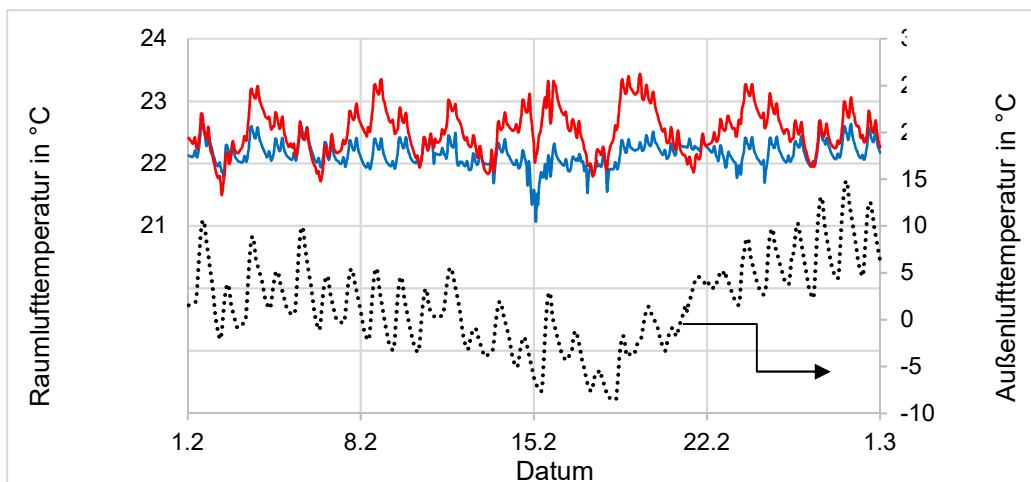


Abbildung 6: Raumlufthtemperaturen mit Einzelraumregelung im Februar in Blau für einen Nordraum und Rot für einen Südraum. Schwarz gepunktet auf der Sekundärachse die Außenlufttemperatur.

In Abbildung 6 sind die Raumluffttemperaturen mit Einzelraumregelung im Monat Februar dargestellt. Schwarz gepunktet ist auf der Sekundärachse die Außenlufttemperatur dargestellt. Man erkennt, dass die operative Temperatur im Nordraum (blau) relativ konstant beim Sollwert von 22,5°C liegt. Die Einzelraumregelung ist hier konstant „An“ und die Vorlauftemperatur variiert mit der Außentemperatur. Im Südraum (rot) schwankt die operative Temperatur bei Einzelraumregelung zwar stärker, aber immer innerhalb des Komfortbereich Klasse I nach EN 16798-1. Die Regelung wechselt bei Unterschreitung von 22°C auf „An“ und bei Überschreitung von 23°C auf „Aus“. Durch die Trägheit des Systems dauert dieser Aufheizzyklus ca. 25-30 Std. Dann überschwingt die Temperatur etwa 10-15 Std. und fällt dann in 24-36 Std. wieder unter die Heizgrenze ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass die aktivierte Außenwand mit Einzelraumregelung den Komfortbereich einhält, aber eine schnelle Änderung der Raumtemperatur, z.B. bei Kälteempfinden im Krankheitsfall, nicht realisierbar ist. Die Vorlauftemperatur (Heizkurve) wurde in einer Parameterstudie ermittelt und liegt in der Heizperiode im Mittel bei etwa 32-33°C. Bei -10°/46°C, und bei +10°/28°C).

2.5 Vergleich mit Niedertemperaturheizkörpern

Eines der beiden Pilotgebäude wird über die aktivierte Außenwand beheizt, das andere mit Niedertemperaturheizkörpern. Damit die Systeme, vor allem in Hinblick auf die Energieeffizienz, verglichen werden können, werden beide Systeme am größeren Gebäude mit Hilfe von Gebäude- und Anlagensimulation untersucht. Jeder Niedertemperaturheizkörper hat ein eigenes Thermostat, also eine Einzelraumregelung. Bei der aktivierten Außenwand wird ebenfalls die Einzelraumregelung zum Vergleich herangezogen. In der Variante „aktivierte Außenwand“ werden in den zwei kritischen Räumen zur Spitzenlastabdeckung zusätzlich direkt elektrische Heizelemente vorgesehen, ebenfalls in den Bädern, da in diesen die 24°C Solltemperatur (2x30 Minuten) wegen der geringen Außenwandfläche nicht erreicht wird.

Die Heizkurve für die Niedertemperaturheizkörper wurde in der Simulation mit -10°/40° und 0°/35° ermittelt und liegt damit etwas niedriger als bei der Wandheizung. In Tabelle 1 werden die Energie- und Strombedarfe beider Systeme gegenübergestellt.

	Aktivierung Außenwand (+direkt-elektrisch)	Niedertemperatur- Heizkörper
Wärme an Raum/Nutzenergie	39,0	37,1
Verteil- und Speicherverluste	7,3	6,3
Strom Wärmepumpe (Heizung+WW)	13,3	13,3
Strom Infrarot - Paneele	4,5	0,0
Strom Pumpen	1,5	1,0
Summe Strom	19,3	14,3

Tabelle 1: Vergleich der Beheizung über aktivierte Außenwände mit Beheizung über Niedertemperaturheizkörper. Alle Werte in kWh/(m²a), Raumsolltemperatur 22.5°C, Bäder 24°C (2x30 Minuten), EBF: 648 m².

Beide Systeme weisen in Kombination mit der guten Hüllqualität für ein saniertes Bestandsgebäude niedrige Endenergiebedarfe auf (Strombedarf: 14,3 – 19,3 kWh/(m²a)).

Zusammengefasst ergibt der Vergleich folgende Ergebnisse:

- Die Tendenz, dass Räume im Winter wärmer werden als die Solltemperatur (höhere mittlere Raumtemperatur), ist bei den flinken Niedertemperaturheizkörpern geringer als bei der trägen Außenwandaktivierung. Dadurch ist die Nutzenergie, welche an den Raum abgegeben wird, ebenfalls um 1,9 kWh/(m²a) geringer.
- Durch zusätzliche Verluste der wärmeren Außenwand, höhere Verteilverluste durch mehr Anbindeleitungen, höherem Pumpenstrombedarf und die zusätzlichen elektrischen Heizelemente, ist der gesamte Strombedarf bei der aktivierten Außenwand um 5 kWh/(m²a) höher (siehe auch Kapitel Diskussion).
- Die Angebotskosten sind bei der aktivierten Außenwand mit 163 €/m²WNF höher als bei den Niedertemperaturheizkörpern mit 133 €/m²WNF (inkl. Verteilung; bei Wandheizung inkl. Fußbodenheizung im Dachgeschoß und inkl. Infrarotpaneele).

2.6 Umsetzung und Diskussion

Bei vorhergenanntem Vergleich liegt die aktivierte Außenwand im Punkt Energieeffizienz 5 kWh/(m²a) höher, wobei 4,5 kWh/(m²a) auf die direkt elektrischen Zusatzheizelemente vor allem in den Bädern entfallen. Würde man diese hydraulisch ausführen, wäre der Unterschied etwa 2 kWh/(m²a). Die Zusatzheizungen sind bei Übertragung auf anderen Gebäude eventuell nicht immer notwendig, bei innenliegenden Bädern und 24°C Solltemperatur aber wahrscheinlich. Hydraulische Lösungen sind teurer und nicht minimalinvasiv, deshalb wurden hier direkt elektrische Elemente geplant. Aufgrund der Rückmeldungen der Bewohner im Januar 2024 über ausreichend hohe Temperaturen in den Bädern (22-24°C) wurde vorerst darauf verzichtet die zusätzlichen direkt elektrischen Heizelemente einzubauen.

Bis Mitte Februar 2024 wurden beide Gebäude provisorisch mit konstanter Vorlauftemperatur, ohne Einzelraumregler und teilweise mit Elektro-Heizpatronen betrieben, da die Wärmepumpen und Gebäudeleittechnik baulich noch nicht umgesetzt waren. Seit Februar 2024 sind beide Systeme mit den vordefinierten Einstellungen und Reglern in Betrieb. Deshalb gibt es keine belastbaren Messergebnisse zu Energieverbräuchen aus dem ersten Winter.

In Abbildung 7 sind die gemessenen Temperaturen vom 14.2. bis 21.2.2024 in zwei Wohnräumen in dem Gebäude mit aktivierter Außenwand dargestellt. Da noch kein längerer Zeitraum mit aktiver Regelung vorhanden ist, können diese Werte noch nicht direkt mit den Aussagen aus Abbildung 6 verglichen werden. Es kann aber festgestellt werden, dass sich die einzelnen Räume im Bereich von etwa 20-22°C befinden, vermutlich während des Lüftens auch kälter. Die Raumthermostateinstellung (Solltemperatur) ist hierbei aber nicht bekannt.

In Rot ist ein Südraum dargestellt, welcher die Regelcharakteristik mit der hohen Trägheit des Systems aus der Simulation qualitativ bestätigt. Die Ausschläge nach unten (18°C) sind vermutlich durch Fensterlüftung bedingt und unabhängig vom Wärmeabgabesystem. In Blau ein Nordraum bei dem die Regelung konstant „An“ ist.

Die vollständige messtechnische Auswertung erfolgt ab dem Winter 2024/2025. Im Vergleich zu den stark schwankenden Temperaturen vor der Sanierung aus Abbildung 1 sind die gemessenen Temperaturen nach der Sanierung in Abbildung 7 deutlich uniformer und gleichmäßiger über die zwei Wohnungen verteilt.

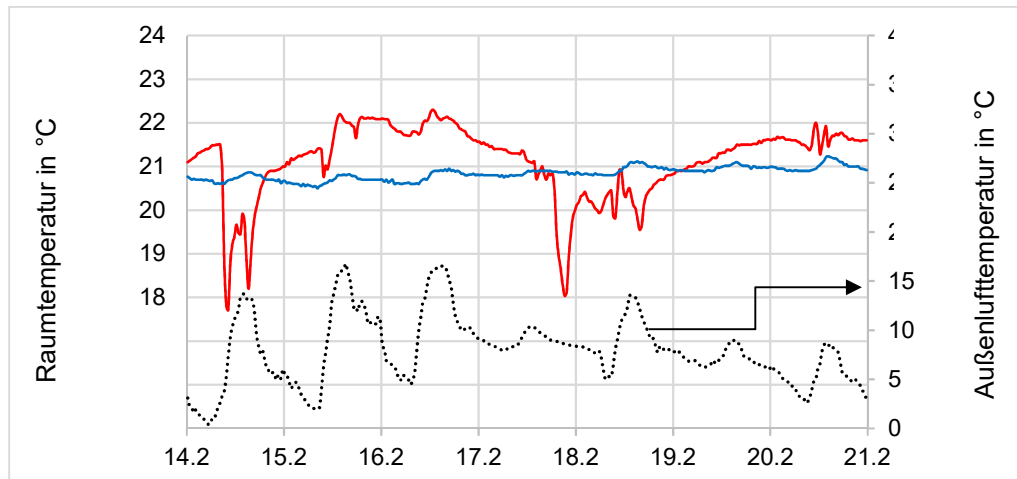


Abbildung 7: Gemessene Temperaturen im Zeitraum von 14.2. - 21.2.2024 in sieben Wohnräumen in dem Gebäude mit aktivierter Außenwand.

3 Fazit und Ausblick

Beide Systeme lassen in Kombination mit einer thermisch hohen Hüllqualität niedrige Energiebedarfe und komfortable Temperaturen erwarten. Eine gute Überdämmung ($U_{\text{Wand}} 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ist für die Effizienz der aktivierten Außenwand essentiell.

Hauptvorteil der aktivierten Außenwand im Vergleich zu Niedertemperaturheizkörpern ist, dass in den bewohnten Wohnungen kein Eingriff stattfinden muss. Auch Kühlung ist mit dem System möglich und es kann, wie in anderen Arbeiten untersucht, die Energieflexibilität des Gebäudes erhöhen (Gumhalter et al., 2022).

Nachteil der aktivierten Außenwand sind der höhere Energiebedarf für die Beheizung, die schlechtere Regelbarkeit aufgrund der Trägheit des Systems und höhere Kosten. Ebenfalls als Nachteil wurde im Projekt die Komplexität in der Ausführung gesehen, was am Prototypcharakter liegen kann. Es gibt Schnittstellen zwischen den Gewerken HLS und Fassadenbau, auch in den Verantwortlichkeiten, welche gut koordiniert sein müssen. Es wird empfohlen, dies frühzeitig im Projekt abzuklären.

Die Installation von Niedertemperaturheizkörpern hingegen ist in der Umsetzung ein Standardvorgehen. Durch die niedrigen Vorlauftemperaturen haben die Niedertemperaturheizkörper allerdings auch eine niedrige Oberflächentemperatur, was die Nutzerakzeptanz erschweren kann.

Damit sich bei beiden Systemen eine hohe Nutzerakzeptanz einstellt, werden die Mieterinnen und Mieter auf die Besonderheiten wie Trägheit bei der aktivierten Außenwand oder niedrige Oberflächentemperaturen bei den Niedertemperaturheizkörpern hingewiesen.

Solange es für die aktivierte Außenwand noch keine ausreichende Praxiserfahrung gibt, ist es sinnvoll, solche Systeme zu simulieren und im Vorfeld eine genaue Analyse der Bestandswand durchführen, da der Bestands-U-Wert einen hohen Einfluss auf die Wirksamkeit und Effizienz hat.

4 Literatur

- Altgeld, H., Mahler, M., Cavelius, R., Horst, J., Dürnhofer, A., & Boettcher, J. (2010). Energieeinspar- und Kostensenkungspotenziale durch den Einsatz von außen liegenden Wandheizungssystemen (aWH) für Niedertemperatur Anwendungen. *Endbericht Projekt LEXU, Fkz, 327370*.
- EQUA. (2024). *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) (5.0)* [Software]. EQUA Simulation AB. <https://www.equa.se>
- Gumhalter, M., Ramschak, T., & Hengel, F. (2022, April). Flexibility potentials of prefabricated facade elements with integrated active layer. *ISEC Conference proceedings. ISEC 2022, 2nd International Sustainable Energy Conference, Graz*. <https://doi.org/10.32638/isec2022>
- Hackl, L.-M., Deralla, A., & Holzer, P. (2022). *Große Neugasse; Sanierung und Heizungsumstellung mit fassadenintegrierter Bauteilaktivierung* (S. 16). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:6185a3ac-4e50-47bc-800f-9da8b49ad6d2/37_Grosse-Neugasse_2022-10-28.pdf
- Hengel, F., Ramschak, T., Gumhalter, M., & Venus, D. (2020, September 23). Showing new concepts with thermal activated prefabricated Façades for retrofitting residential buildings. *BauSIM 2020*. BauSIM 2020.
- Meteotest. (2021). *Meteonorm (Version 8)* [Software]. Meteotest. www.meteotest.ch
- Passivhaus Institut. (2023). *PHPP 10.5 Passivhausprojektierungspaket (10.5)* [Software]. Passivhaus Institut. <http://www.passiv.de>
- Roman Hörner. (2024). Auswirkung der Regelstrategie auf die Energieeffizienz eines Bestandsgebäudes mit nachträglicher Bauteilaktivierung der Bestandswand [Masterarbeit Fachhochschule Vorarlberg].
- Schmidt, C. W. (2019). *Feldtest und dynamische Simulation der außenliegenden Wandtemperierung* [PhD Thesis]. University of Luxembourg, Luxembourg.
- Schweizer, P. (2021). *Wohnen findet Stadt! - Smarte Modernisierung und Umsetzung am Beispiel der Burgfriedsiedlung Hallein* (S. 111) [Publizierbarer Endbericht]. Paul Schweizer Architekt. https://smartcities.at/wp-content/uploads/sites/3/BGR5_2021_Wohnen-findet-Stadt_Endbericht.pdf
- SIA 2024:2015 (Hrsg.). (2015). *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.