

LEXU II – EINSATZ VON AUSSENLIEGENDER WANDTEMPERIERUNG BEI DER GEBÄUDESANIERUNG

C. Schmidt¹, H. Altgeld¹, B. Groß¹, G. Luther² und D. Schmidt¹

¹IZES gGmbH, Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken, Germany

² Forschungsstelle Zukunftsenergie, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Germany

Kontakt: schmidt@izes.de

KURZFASSUNG

Das Forschungsprojekt „LEXU II“ beschäftigt sich mit der Entwicklung und Erprobung einer außenliegenden Wandtemperierung. Dabei dienen wasserführende Heizflächen, eingebettet in einer Putzschicht unter einem Wärmedämm-Verbundsystem als niederexergetisches Temperierungssystem. Erweitert man diesen Aufbau um einen Luftspalt zwischen Heizfläche und Dämmung, so kann die außenliegende Wandtemperierung zu einer außenliegenden Lufttemperierung erweitert werden. Durch einen Vergleich mit Messdaten von Laborwänden wurden für beide Komponenten Simulationsmöglichkeiten entwickelt. In dem hier vorliegenden Beitrag werden die Komponenten und die Simulationsvarianten dargestellt und bewertet.

An outlying wall tempering is the main part of the research project „LEXU II“. The outlying wall tempering is a panel heating that is attached between the existing wall and the new thermal insulation. By the creation of an air duct between the thermally active layer and the insulation, the outlying wall tempering can be extended to an outlying air heating. External air can be heated or cooled and provided to the room as tempered fresh air. For both components (outlying wall tempering and outlying air tempering) simulation tools were adapted/developed. The simulation results were validated with measurements at laboratory walls. The last part of the project is the realisation of the system at a real building at the University of Saarland, in Saarbruecken.

EINFÜHRUNG

In dem Forschungsprojekt „Low Exergy Utilization – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung – Feldtest; CO₂-Wärmepumpe mit Eisspeicher“ (kurz LEXU II) mit dem Förderkennzeichen 0327370Y werden verschiedene Anwendungen von Außenwand-Temperierungssystemen theoretisch und experimentell bis hin zum Feldtest untersucht. In einem vorgeschalteten Projekt LEXU (Fkz. 0327370T) wurden die Grundfunktionen einschließlich geeigneter Realisierungen derartiger Außenwandsanierungen untersucht. Die Anwendungsziele sind vor allem Altbauten mit

schlechtem U-Wert der Bestandswände. Um eine Wärmezufuhr mit einem sehr niedrig temperierten Heizfluid (i.e. Nutzung von Heizquellen mit niedriger Exergie) zu ermöglichen, wird zusätzlich zu einem außen aufzubringenden Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) zuerst eine Flächenheizung auf die Außenwand aufgebracht. Dieser Wandaufbau wird im Rahmen des Projektes als außenliegende Wandheizung (aWH), oder auch als außenliegende Wandtemperierung (aWT) bezeichnet (Schema siehe Abbildung 1). Die aWH ist die Hauptkomponente innerhalb des Projektes. In einem Arbeitspaket wurde als niederexergetische Erweiterung der aWH eine außenliegende Luftheizung (aLH) entwickelt (Schema siehe Abbildung 2).

In parallelen Arbeitsschritten werden zudem folgende Themen innerhalb des Projektes untersucht:

- Einbindung einer CO₂-Wärmepumpe zur besseren Ausnutzung des Temperaturgleits für verschieden temperierte Wärmesenken im Gebäude
- Einbindung eines Phasenwechspeichers (Eisspeicher) als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (Versorgung aWH/aLH)
- Einbindung von PVT-Kollektoren (Kombination aus PV-Modulen und Solarthermie-Absorbern) zur Regeneration des Eisspeichers und als direkte Wärmequelle für die aWH/aLH, sowie als Teil-Stromquelle für die Wärmepumpe
- Einsatz der aWH/aLH zur Kühlung oder Vortemperierung

Seit Mitte 2015 wird das System in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme (AES) der Universität des Saarlandes (UdS) an einem Demonstrationsobjekt umgesetzt. Im Rahmen des Feldtests wurde die West-Fassade eines Bürogebäudes aus den 70er Jahren mit der aWH und teilweise mit der aLH belegt. Als Wärmeerzeuger kommt eine Wärmepumpe zum Einsatz. Zusätzlich wird ein innovatives Wärmequellensystem, bestehend aus PVT-Kollektoren und Eisspeicher installiert. Im Feldtest können die Komponenten und das System anhand praxisrelevanter Bedingungen getestet und überprüft werden. Gleichzeitig können Aufbau und Anbringung der Komponenten unter realistischen Bedingungen durchgeführt und dokumentiert werden.

Außenliegende Wandheizung (aWH)

Die ursprüngliche Idee der außenliegenden Wandheizung ist, Niedertemperaturwärme für die Gebäudebeheizung nutzbar zu machen. Das Verfahren beruht darauf, Wärme- oder Kälteeintrag an der Außenwand von Gebäuden zu ermöglichen und zwar über dort angebrachte Flächenheizsysteme, zwischen Außenwand und neuem WDVS. Das System der aWH ist demzufolge immer mit einer energetischen Sanierung der Bestandswand (Aufbringung eines WDVS) verbunden. In Abbildung 1 ist der Wandaufbau des Systems nach der Sanierung dargestellt. Die Flächentemperierung wird zwischen Bestandswand und WDVS eingeputzt.

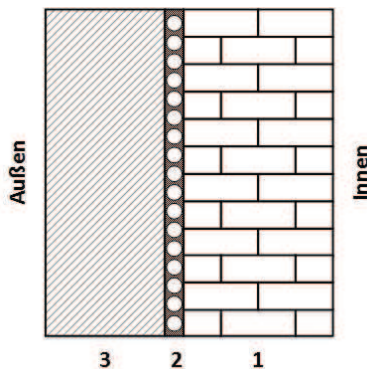


Abbildung 1: Schema der aWH: Bestandswand (1), eingeputzte Kapillarrohrmatten (2) und WDVS (3)

Durch die Lage der Heizebene zwischen Bestandswand und WDVS bietet das System einige Vorteile:

- Das Aufbringen der aWH kann „von außen“ erfolgen. Hierdurch wird eine Sanierung im Bestand bei weitgehender Störungsfreiheit für die Gebäudebewohner erreicht.
- Lagebedingt kann die aWH auf einem sehr niedrigeren Temperaturniveau betrieben werden. Je nach Randbedingungen können die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen mit mittleren aWH-Temperaturen...
 - o $< 20\text{ °C}$ verringert werden.
 - o $\approx 20\text{ °C}$ kompensiert werden.
 - o $> 20\text{ °C}$ überkompensiert werden.
- Die Außenwand wird thermisch aktiviert und kann als Wärme- oder Kältespeicher im Bestand nutzbar gemacht werden.
- Durch den Einsatz der aWH werden die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite der Außenwände erhöht - dies steigert die thermische Behaglichkeit (bei Betrachtung des Wertepaars: Raumlufttemperatur und mittlerer Temperatur der Umschließungsflächen, vgl. Willems et. al., 2006)

Durch die Lage der aWH entstehen jedoch auch Nachteile:

- Ein Teil der über die aWH eingebrachten Wärme geht zusätzlich über die Wärmedämmung verloren. Dieses Verhalten wird mit dem *Wirkungsgrad* der aWH charakterisiert. Der Wirkungsgrad ist abhängig vom thermischen Widerstand der Bestandswand und der neuen Außendämmung. Bei den bisher betrachteten Wandaufbauten lag der Wirkungsgrad der aWH im Bereich zwischen 80 und 90 %.
- Das aWH-System ist träge (v.a. abhängig vom Aufbau der Bestandswand). Demzufolge sind u.U. anspruchsvolle Regelungsstrategien notwendig, um die aWH sinnvoll betreiben zu können.

Weitere Details zu den theoretischen Grundlagen und dem *Wirkungsgrad* der außenliegenden Wandtemperierung können Luther & Altgeld (2002) entnommen werden.

Außenliegende Luftheizung (aLH)

Eine Ausweitung des Niedrigexergiekonzepts wird durch die bauliche Ausgestaltung eines Luftkanals zwischen thermisch aktivierter Bestandswand und WDVS möglich (Luther, 2008). Hierdurch wird die Wandtemperierung zu einer Zuluft-Temperierung (teilweise Luftheizung) erweitert und weitere exergetische Vorteile können erschlossen werden. In Abbildung 2 ist das Schema der aLH dargestellt. Die durchströmende Luft nimmt einen Teil des in der Außenwand fließenden Wärmestroms auf. Daher verringert sich der Verlust-Wärmestrom über die Dämmung und noch niedrigere Vorlauftemperaturen können nutzbar gemacht werden.

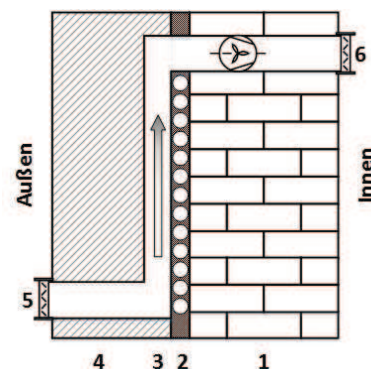


Abbildung 2: Schema der aLH: Außenwand (1), eingeputzte Kapillarrohrmatten (2), Luftkanal (3), WDVS (4), Lufteinlass (5) und Luftauslass (6)

Zudem bewirkt die aLH eine Verbesserung des Wirkungsgrades, da der Nutzwärmestrom nach Innen nahezu unverändert bleibt und die Lüftungswärme

zusätzlich genutzt werden kann. Das bedeutet, dass die systembedingten Verluste der aWH durch Verwendung der aLH weiter minimiert werden können. Die bisher durchgeführten Berechnungen und Simulationen zeigen, dass der Wirkungsgrad der Kombination von aWH und aLH > 90 % sein kann. Zusätzlich wird die träge regelbare aWH durch die sehr schnell reagierende aLH regelungstechnisch günstig ergänzt. Die aLH verringert somit auch die Heizlast für die trägere aWH. Durch Mobilisierung von in der Bestandswand gespeicherter Wärme/Kälte lässt sich der Wärmestrom kurz- bis mittelfristig erhöhen. Beim Abschalten des aWH-Vorlaufs kann die aLH noch über die Außenwand als Speicher betrieben werden.

Eine Erweiterung der aLH um eine Umluftoption ist in Abbildung 3 zu erkennen. Dieses Konzept wurde im Rahmen des aktuellen Demonstrationsobjektes umgesetzt. Neben der Temperierung von Außenluft kann bei diesem Konzept auch die Umluft bzw. ein Gemisch aus Außen- und Umluft temperiert werden. Durch diese „Umluft-Erweiterung“ kann die aLH für weitere Einsatzfälle nutzbar gemacht werden.

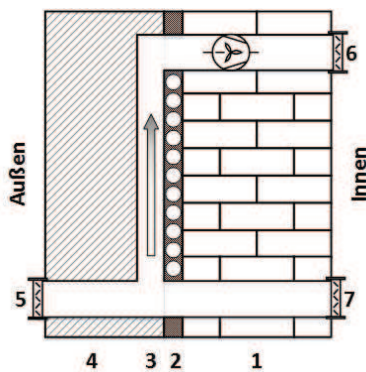


Abbildung 3: Schema der aLH mit Umluft-Option: Außenwand (1), eingeputzte Kapillarrohrmatten (2), Luftkanal (3), WDVS (4), Lufteinlass Außenluft (5), Luftauslass (6) und Lufteinlass Umluft (7)

Innerhalb der Projekte LEXU & LEXU II wurden für die beiden Komponenten (aLH & aWH) Laborwände im Originalmaßstab aufgebaut und Messungen durchgeführt. Parallel hierzu wurden Simulationen erarbeitet. Diese Arbeitsschritte und deren Resultate werden im Folgenden erläutert.

MESSUNGEN

Für die beiden Komponenten aWH und aLH wurden jeweils eigene Laborwände im Technikum der IZES gGmbH errichtet, siehe Abbildung 4 (aWH) und Abbildung 5 (aLH). Anhand der Laborwände wurden stationäre und instationäre Messungen bei verschiedenen Randbedingungen (v.a. verschiedene Vorlauftemperaturen) durchgeführt und ausgewertet.

Messungen: Laborwand aWH

Dieser Unterpunkt behandelt die experimentellen und theoretischen Untersuchungen einer aWH an einer Laborwand. Die Laborwand, die den typischen Wandaufbau einer Bestandswand nachbildet, hat eine Fläche von 4 m² (2 x 2 m). Der Schichtaufbau der Laborwand ist in Tabelle 1 aufgeführt. Der U-Wert der gesamten Laborwand liegt bei ca. 0,2 W/(m²K), der U-Wert der fiktiven Bestandswand bei rund 1,6 W/(m²K).

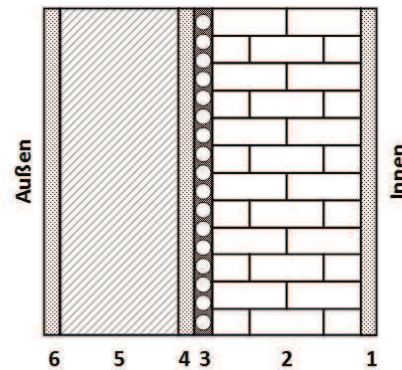


Abbildung 4: Schnitt durch die aWH-Laborwand; die einzelnen Schichten sind in Tabelle 1 aufgeführt

Tabelle 1: Schichtaufbau der Laborwand „aWH“

NR.	SCHICHT	BESCHREIBUNG	DICKE
1	Innenputz	Leicht-Gipsputz	15 mm
2	Mauerwerk	Vollziegel 30x24x11,3 cm	300 mm
3	Außenputz, alt	Leichtputz	20 mm
4	Putz mit Gewebematten	Leichtputz und Klebemörtel	16 + 10 mm
5	Dämmung	Platten WL 035	140 mm
6	Außenputz, neu	Lehmputz	15 mm

Ergänzend zur Messung der Temperaturen in der Wand, wurden auch der Verlauf der Umgebungstemperatur, die Vor- und Rücklauftemperaturen der Fluide, sowie deren Volumenströme messtechnisch erfasst. Die Beheizung der Wand erfolgte über einen Wärmespeicher, der mit einem Heizstab auf die notwendigen Temperaturen gebracht wurde.

An der Laborwand wurden mehrere stationäre und instationäre Messreihen gefahren. Bei den stationären Messungen wurde dabei eine spezifische Leistung der aWH von über 50 W/m² erreicht, bei einer Übertemperatur von rund 28 K. Der Wirkungsgrad der aWH bei dem Schichtaufbau der Laborwand liegt bei ca. 87 %. Die Ergebnisse der Simulationen wurden im Anschluss mit den Messwerten validiert.

Messungen: Laborwand aLH

Auch für die aLH wurde eine Laborwand errichtet. Für die Untersuchung der Wärmetransportvorgänge wurde eine ca. 2 m² große Laborwand aufgebaut, an der Messungen unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt wurden. Bei der Konzeption der Laborwand wurde darauf geachtet,

dass die Wand groß genug ist, um die Strömungsverhältnisse im realen Fall ohne zusätzliche Ähnlichkeitsbetrachtungen beurteilen zu können. Nach Überprüfung der Homogenität der Strömungsverhältnisse der Luft über die Laborwand wurde anhand von real erwarteten Luftmengen und Temperaturen die erreichbare Wärmeübertragung messtechnisch bestimmt, um diese entsprechenden Simulationen gegenüberzustellen.

Eine Skizze der Laborwand ist in Abbildung 5 dargestellt. Durch eine Öffnung im Deckel am Fuß der Wand wird die Luft aus der Umgebung angesaugt. Die Luft überströmt die eingeputzte, temperierte Kapillarrohrmatte und verlässt die Laborwand am oberen Ende. Der luftüberströmte Bereich der Laborwand ist mit zwölf Temperatur-Messstellen ausgerüstet. Zusätzlich wurden die Ein- und Austrittstemperaturen der Luft und des Wassers gemessen. Auch Wasser- und Luftvolumenstrom wurden erfasst, ebenso die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur und -druck, Luftfeuchte).

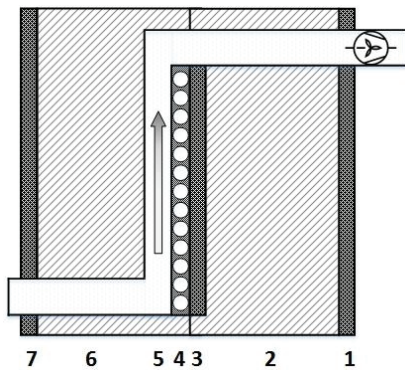


Abbildung 5: Schnitt durch die aLH-Laborwand; die einzelnen Schichten sind in Tabelle 2 aufgeführt

Tabelle 2: Schichtaufbau der Laborwand "aWH"

NR.	BESCHREIBUNG	DICKE
1	MDF-Trägerplatte	18 mm
2	Styropor-Isolierung	160 mm
3	MDF-Platte als Halterung für Matten	10 mm
4	Kapillarrohrmatte in Spezialputz	10 mm
5	Luftkanal mit Abstandshaltern	20 mm
6	Styropor-Isolierung	160 mm
7	MDF-Trägerplatte	18 mm

Es wurden 42 quasistationäre Betriebszustände untersucht. Dabei wurde die Wärmeübertragung im Luftkanal durch charakteristische Kennzahlen in Anlehnung an VDI e.V. (2013) beschrieben. Hierzu wurde die Wärmeübertragerkennzahl N bzw. NTU (number of transfer units) für die aLH berechnet. Diese dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl berechnet sich aus den Wärmekapazitätsströmen und den dimensionslosen Temperaturdifferenzen (beides Luft- und Wasser seitig). Sie kann jedoch auch über

den charakteristischen U-Wert „ U_{WUT} “ entsprechend Gleichung 1 (Polifke & Kopitz, 2009) ausgedrückt werden.

$$N = U_{WUT} * \left[\frac{A_{aLH}}{C_L} \right] \quad (1)$$

N = Wärmeübertragerkennzahl [];

U_{WUT} = charakteristischer U-Wert der aLH als Wärmeübertrager [$W/(m^2K)$]; A_{aLH} = Fläche der aLH [m^2]; C_L = Wärmekapazitätsstrom der Luft [W/K]

Über die 42 ausgewerteten Betriebszustände ergab sich eine fast konstante Wärmeübertragerkennzahl N von $1,25 (\pm 10 \%)$ bzw. ein nahezu konstanter Wert von $U_{WUT} \approx 5,3 W/(m^2K)$. Insgesamt wurde bei den über 40 Einzelversuchen eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse festgestellt. Die Wärmeübertragungsvorgänge in der Wand konnten mit Hilfe der Betriebscharakteristik von Wärmeübertragern gut beschrieben werden. Das instationäre Verhalten der Austrittstemperaturen bei sprunghaft veränderten Eingangsbedingungen konnte in über 40 Einzelversuchen untersucht werden. Hier ergaben sich durchweg Totzeiten bis zur praktischen Erreichung des stationären Endzustands von $< 1 h$. Mit Hilfe der Messungen an der Laborwand wurde somit eine ausreichende experimentelle Grundlage für die Validierung der dynamischen Simulationen gelegt. Gleichzeitig konnten wichtige Kenngrößen der aLH ermittelt werden.

SIMULATION

Simulation: Außenliegende Wandheizung

Für die Modellierung der aWH wurden die Simulationsprogramme HEAT 2 (Blomberg, 2000) und TRNSYS (Klein et al., 2002) eingesetzt. Die stationären Messungen wurden in HEAT abgebildet und die instationären Messungen in TRNSYS (Altgeld et al., 2009). In TRNSYS sind für die Simulation von aktiven Wandelementen spezielle Randbedingungen einzuhalten (Koschenez & Lehmann, 2000). Diese Bedingungen können jedoch bei zu kleinen Massenströmen, zu dünnen Wandschichten und zu geringen Rohrabständen bei der aWH nicht eingehalten werden. Um diese Probleme zu umgehen wird eine thermisch gleiche Wand in TRNSYS simuliert. Durch Anpassungen der Parameter der einzelnen Schichten wird die Wand in TRNSYS so abgeändert, dass diese thermisch der abzubildenden Wand entspricht, mit dem prinzipiellen Schichtaufbau wie in Tabelle 1, jedoch die oben genannten Bedingungen erfüllt.

Simulation: Außenliegende Luftheizung

In einem ersten Schritt wurde für die aLH ein Berechnungsprogramm in Excel unter Verwendung von VBA-Subroutinen erstellt. Dabei wurde der Luftkanal in einzelne Segmente unterteilt und

schrittweise, unter Verwendung der typischen Gleichungen für Wärmeübertrager berechnet. Parallel hierzu wurden Simulationsmöglichkeiten in TRNSYS erarbeitet. Ziel der Simulationen war es, eine Aussage treffen zu können, wie stark sich die Luft beim Durchqueren der Wand und bei festgelegten Randbedingungen erwärmen kann und welche Energiemengen von den Kanal-Oberflächen auf die Luft übertragen werden können. Zugleich sollten die Auswirkungen auf die aWH ermittelt werden (z.B. Wärmedurchgang nach innen, Zeitkonstanten). Ein weiteres wichtiges Kriterium war, dass der Simulationsaufwand auch für größere Gebäude handhabbar bleiben sollte. Schließlich konnten zwei wesentliche Simulationsmöglichkeiten identifiziert werden (Schmidt, 2013)

- Erstellung eines Mehrzonenmodells

Das Mehrzonenmodell beruht auf der Nutzung von TRNSYS-Type 56 (Multizone Building) und dem SketchUp-PlugIn für TRNSYS. Entsprechend Abbildung 6 wird der Luftkanal in Type 56 in mehrere Zonen unterteilt (vergleichbar mit der Vorgehensweise bei der VBA-Berechnung). TRNSYS berechnet für jede dieser Zonen die mittlere Lufttemperatur (Luftknoten). Durch Unterteilung des Luftkanals in möglichst viele Zonen kann die Temperatur der letzten Zone der Austrittstemperatur angenähert werden (siehe Abbildung 6). Die Eingabe der Zonen über das SketchUp-PlugIn ist notwendig um den Strahlungsaustausch zwischen den Flächen im Luftkanal detailliert zu berücksichtigen (die Seitenwände des Luftkanals werden beim Strahlungsaustausch nicht berücksichtigt).

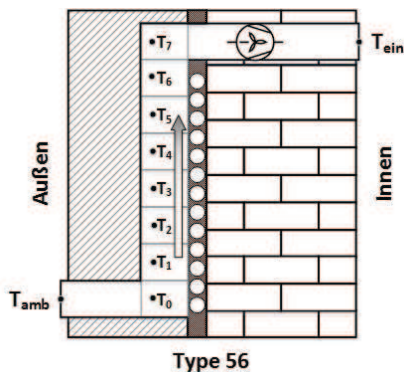


Abbildung 6: Schema des Mehrzonenmodells in TRNSYS unter Verwendung von Type 56; hier dargestellt ist ein 8-Zonen-Modell

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Luftkanal in 1, 2, 4, 8, 16, 32 und 64 Zonen unterteilt und in TRNSYS modelliert. Der Luft-Massenstrom der aLH wurde entsprechend der Messungen auf dem Prüfstand auf 72 kg/h eingestellt; bei einem Luftspalt der aLH von 20 mm und einer Breite des Luftkanals von ca. 880 mm. Die

Raumtemperatur wurde mit 20 °C angenommen und die Umgebungstemperatur T_{amb} ist gleich -15 °C. Die Vorlauftemperatur der aWH beträgt für die Simulationen konstant 35 °C. Die erreichte Endtemperatur im Luftspalt ist in Tabelle 3 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Änderung der End-Temperatur mit zunehmender Zonenanzahl immer geringer wird. Der Aufwand für eine über 64 Zonen hinausgehende Segmentierung ist nicht mehr sinnvoll darstellbar. Da mit Type 1230 eine zusätzliche Simulationsmöglichkeit zur Verfügung steht, wurde die Simulation unter Nutzung dieses Types weitergeführt und eine weitere Segmentierung nicht weiter verfolgt. Spätere Vergleiche haben gezeigt, dass eine Unterteilung des Luftspalts in 64 Zonen hinreichend gute Ergebnisse liefert.

Tabelle 3: Erreichte Endtemperatur im Luftspalt der aLH beim Mehrzonenmodell über die Anzahl der Unterteilung

ZONEN	T_{END} [°C]
1	15,0
2	18,6
4	20,8
8	22,0
16	22,5
32	22,9
64	23,3

- Verwendung von Type1230

Bei Type 1230 handelt es sich um ein TRNSYS-Type zur Modellierung von hinterlüfteten Fassaden (vgl. Thornton, 2007). Über das Type wird eine vorgehängte Fassade, bestehend aus einem äußeren Teil, einem Luftspalt und der Verknüpfung zum TRNSYS-Gebäude-Type (Type 56) modelliert. Die Verknüpfung zu Type 56 erfolgt über einen sogenannten „resistive Layer“ (fiktiver, masseloser Layer zur Verknüpfung mit der Bestandswand), siehe auch Abbildung 7. Im Gegensatz zum Mehrzonenmodell wird von dem Type 1230 die Endtemperatur am oberen Ende des Luftspalts als Ergebnis/Output ausgegeben. Für jede aLH-Teilfläche muss also eine Ausführung von Type 1230 in TRNSYS modelliert werden. Dies erlaubt auch die Eingabe größerer Gebäude mit mehreren aLH-Teilflächen. Die Anzahl von Type 1230 innerhalb einer TRNSYS-Simulation ist nicht begrenzt, hier besteht also keine Limitierung. Über einen Vergleich einer Beispielwand, die einerseits nur in Type 56 und andererseits teilweise in Type 56 und Type 1230 modelliert wurde, konnte sichergestellt werden, dass beide Modelle auf die gleichen Wärmetransportgleichungen zurückgreifen. Bei dem Vergleich beider Simulationen mit verschiedenen Randbedingungen wurden Abweichungen von < 1 % in Bezug auf die Temperaturen und Energien ermittelt. Bei gleichem Wandaufbau liefern beide

Lösungswege fast identische Ergebnisse. Type 1230 kann also generell auch zur Modellierung von Außenwänden genutzt werden (in Verbindung mit Type 56, siehe Abbildung 7).

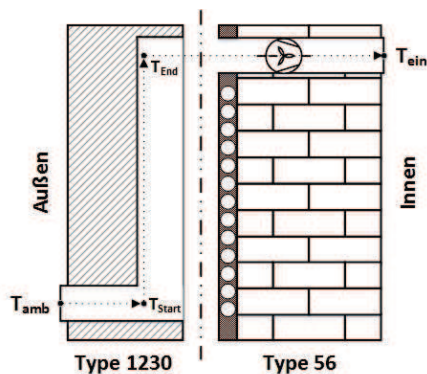


Abbildung 7: Schema der TRNSYS-Verknüpfung von Type 1230 und Type 56 über einen fiktiven Layer

Zum Vergleich mit dem Mehrzonenmodell wurde eine Simulation mit gleichen Randbedingungen für die aLH durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse ist in Tabelle 4 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es leichte Abweichungen zwischen den beiden Modellen gibt. Die Endtemperatur im Luftspalt weicht um ca. 0,2 K voneinander ab. Dabei liegt die Temperatur von Type 1230 unter der Temperatur des Mehrzonenmodells. Mit Q_{vent} wird die Energie bezeichnet, die von den Umfassungsflächen der aLH an die Luft übertragen wird. Hier kommt es zu einer Abweichung von < 0,3 % beim Vergleich der beiden Modelle.

Tabelle 4: Vergleich Simulationsmodelle „aLH“

MODELL	T _{END} [°C]	Q _{VENT} [kJ/h]
Mehrzonenmodell (64)	23,3	2766
Type 1230	23,1	2759

Vor dem Hintergrund, dass es sich um völlig getrennt entwickelte Simulationen handelt, sind die Abweichungen als sehr gering zu bewerten. Da es sich jedoch zunächst nur um Simulationen handelt, lässt sich noch nicht abschätzen, in wie weit mit den Simulationen die gemessenen Werte reproduziert werden können.

VERGLEICH MESSUNG – SIMULATION

Die oben beschriebenen Messungen an den Laborwänden wurden mit Simulationen und eigenen Berechnungen verglichen, um die Simulationsergebnisse zu validieren. Dabei wurden die Bedingungen an den Laborwänden in der Simulation abgebildet.

Vergleich Messung – Simulation: aWH

In einem ersten Schritt wurde versucht die an der Laborwand gemessenen Werte mit HEAT abzubilden. Dabei wurde mit HEAT ein äquivalenter Temperaturverlauf durch die Wand berechnet. Der

Vergleich zwischen dem gemessenen Temperaturverlauf und dem simulierten ist für ein Beispiel in Abbildung 8 zu erkennen. Im Durchschnitt tritt eine Abweichung, bezogen auf die Temperatur von ca. 2,5 % bzw. 0,81 K auf. Die maximale Abweichung liegt prozentual bei $\pm 4\%$ bzw. absolut bei $\pm 1,2$ K. Abweichungen in dieser Größenordnung traten auch bei allen anderen untersuchten Zuständen auf.

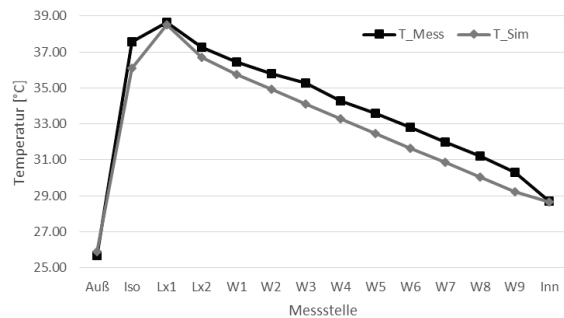


Abbildung 8: Gemessener und simulierter Temperaturverlauf über die Wandkonstruktion (links außen, rechts innen)

Bei parallel durchgeführten Simulationen unter Verwendung von TRNSYS-Type 56 (Multizone Building) wurden Abweichungen in ähnlicher Größenordnung ermittelt. Bei den TRNSYS-Simulationen kam es prozentual zu Abweichungen von < 2 % bzw. absolut zu Abweichungen von maximal 0,6 K, bezogen auf die gemessenen Temperaturen an der Laborwand. Diese Abweichungen sind in einem akzeptablen Rahmen, so dass für die Simulation der aWH mit HEAT und TRNSYS zwei geeignete Simulationswerkzeuge zur Verfügung stehen. Für dynamische Simulationen ist jedoch TRNSYS besser geeignet als HEAT.

Vergleich Messung – Simulation: aLH

Von den über 40 Betriebszuständen wurden sieben ausgewählt, detailliert analysiert und anschließend in Excel (VBA) nachgerechnet sowie in TRNSYS modelliert (Mehrzonenmodell und Type 1230). In Abbildung 9 sind die Ergebnisse im Vergleich mit den Messungen aufgeführt. Die Abweichung wurde dabei in Bezug auf die erreichte Endtemperatur berechnet. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass alle Abweichungen in dem Bereich + 2 % bis $\approx 0\%$ liegen, also in einem sehr akzeptablen Rahmen. In absoluten Werten sind die Abweichungen $\leq \pm 1$ K, bezogen auf die gemessene Temperatur. Es ist zudem zu erkennen, dass die Differenzen der einzelnen Ergebnisse untereinander sehr gering sind. Die verschiedenen Berechnungen liefern fast identische Ergebnisse. Die Differenzen sind stets < 0,5 %, ein Indiz dafür, dass alle Modelle auf die gleichen theoretischen Grundlagen zurückgreifen. Vergleicht man die mittlere Abweichung zum Experiment, so liegt diese beim Mehrzonenmodell bei ca. 0,7 %, bei

Type 1230 bei 0,83 % und bei der VBA-Berechnung bei 0,86 %. Die Ergebnisse der Berechnung und Simulationen liegen bis auf Zustand 7 alle über den gemessenen Werten. Beim Mehrzonenmodell für Zustand 7 treten minimale negative Abweichungen auf.

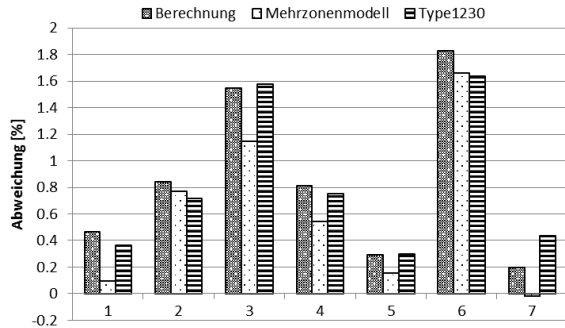


Abbildung 9: Vergleich der Berechnung und der Simulationen mit den Messungen für die sieben untersuchten Zustände

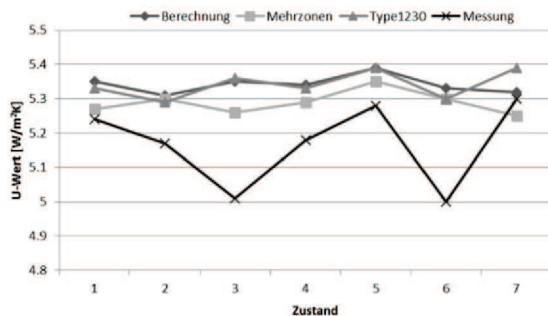


Abbildung 10: Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten U-Werte [W/(m²K)] für die sieben Zustände

Abbildung 10 zeigt den Verlauf des berechneten U-Wertes für die sieben Zustände. Die Werte für den U-Wert liegen in einem relativ engen Band zwischen 5 und 5,4 W/(m²K). Dabei ist zu erkennen, dass der auf Grundlage der Messung berechnete U-Wert für die Zustände 3 und 6 deutlich von den restlichen Werten abweicht. Für diese beiden Zustände wurde ein U-Wert von rund 5 W/(m²K) berechnet. Die U-Werte auf Grundlage der Simulationsergebnisse und der eigenen VBA-Berechnungen liegen sehr eng um einen Wert von 5,3 W/(m²K). Insgesamt stimmen die gemessenen und simulierten bzw. berechneten U-Werte sehr gut überein. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse hat gezeigt, dass die Abweichungen zwischen Messung und Simulation sehr stark von der Temperaturdifferenz zwischen der Wasserseite und der Luftseite abhängen. Diese Tatsache ist in Abbildung 11 dargestellt. Hier ist für die drei Zustände 5, 4 und 6 die Temperaturdifferenz „Wasser-Luft“ und die Abweichung in %, bezogen auf die erreichte End-Temperatur dargestellt. Je größer die Temperaturdifferenz, desto größer die prozentuale Abweichung. Die Ergebnisse der Berechnung und Simulation liegen jedoch auch hier

sehr dicht beieinander. Es liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die Abweichungen durch nicht messbare Wärmeverluste an der Laborwand verursacht werden. Die Laborwand wurde zwar umfassend isoliert, natürlich treten dennoch Wärmeverluste im Vergleich zu dem idealisierten System der Simulation bzw. Berechnung auf.

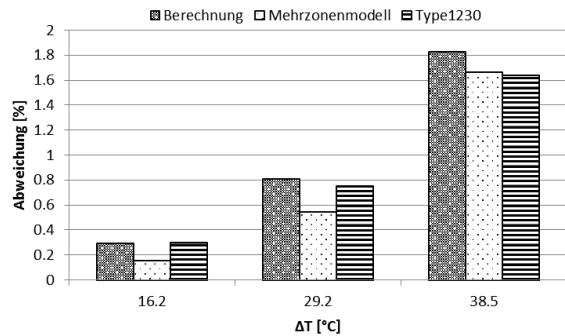


Abbildung 11: Vergleich der Abweichung bezogen auf die Temperaturdifferenz (Wasser – Luft) für die Zustände 5, 4 und 6

VERGLEICH MESSUNG-BERECHNUNG

Parallel zu den Simulationen wurde das Außenluft-Temperierungssystem in Form eines Netzwerkmodells theoretisch untersucht und berechnet (Luther, 2013). Dabei wurden die Wärmewiderstände und Wärmeflüsse der Laborwand weitestgehend abgebildet. Für den Wärmeübergang von der Luft auf die Kanalwände wurden die entsprechenden Gleichungen des VDI-Wärmeatlas (VDI e.V., 2013) genutzt. Die detaillierte mathematische Modellierung des Systems ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Der Vergleich der gemessenen Werte für die Lufterwärmung in der Mauerwand (QL), mit dem nach dem Modell errechneten Daten (QL_e) zeigt für alle Betriebszustände eine beeindruckende Übereinstimmung. Diese wird durch die Treffergenauigkeit (QL_e/QL) beschrieben, siehe Abbildung 12. Bei der Berechnung von QL_e wurden für den Wärmeübergang zwei Randbedingungen angewendet: Konstante Wandtemperatur (linke Kurve, T=const) und konstanter Wärmestrom (rechte Kurve, Q=const). Die realen Verhältnisse liegen zwischen diesen beiden idealisierten Bedingungen. Die etwas unterschiedliche Form der beiden Kurven ist weitgehend nur ein Artefakt der gewählten Klasseneinteilung.

ERGEBNISANALYSE

Alle bei der Modellierung und Berechnung der aWH und aLH auftretenden Abweichungen befinden sich in einem akzeptablen Rahmen. Abweichungen, die über diesen Rahmen hinausgehen, konnten begründet und bereinigt werden. Durch eigene Berechnungen konnten auch die physikalischen Grundlagen der Komponenten verifiziert werden.

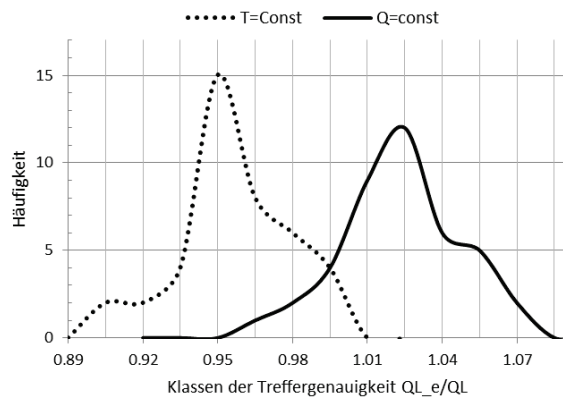


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Treffergenauigkeit für die Übereinstimmung von berechneter (QL_e) und gemessener (QL) Luftherwärmung (Luther, 2013)

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Simulation der Komponenten aWH und aLH mit Hilfe der Software TRNSYS möglich ist. Eine Validierung der Simulationsergebnisse konnte durch Vergleiche mit Messungen an Laborwänden durchgeführt werden. Zusätzlich wurden eigene Berechnungen und Simulationen mit anderen Simulationsprogrammen durchgeführt, um die mit TRNSYS simulierten Werte zu überprüfen. Für die weitere Bearbeitung des Projektes und weitere Studien steht somit ein validiertes Simulationswerkzeug zur Verfügung.

AUSBLICK

Seit Mitte 2015 wird eine Feldtestfassade auf dem Campus der Universität des Saarlandes realisiert. Die aktive Fassadenfläche besteht aus rund 140 m² außenliegender Wandheizung und etwa 7 m² außenliegender Luftheizung. Parallel hierzu werden weiterführende Simulationen der aWH und aLH u.a. anhand von Referenzgebäuden (vgl. Haller et al. 2013, Part A und Part B) durchgeführt.

DANKSAGUNG

Die Projekte LEXU und LEXU II wurden gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland. Zuwendungsgeber ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Fördernummer: 0327370Y/T. Wir möchten uns an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung bedanken.

LITERATUR

Altgeld, H., Boettcher, J., Dürnhöfer, A., Mahler, M. 2009. Experimentelle und theoretische Untersuchungen eines Außenwand-Heizsystems, Abschlussbericht zu AP5 des Projektes LEXU, IZES gGmbH, Saarbrücken

Blomberg, Thomas 2000. HEAT 2 – A PC-program for heat transfer in two dimensions, Building Technology Group, M.I.T, Cambridge/Dept. of Building Physics, Lund, Sweden

Haller, Dott, Ruschenburg, Ochs, Bony 2013. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part A: “General Simulation Boundary Conditions” and Part B: “Buildings and Space Heat Load”, Report C1

Klein, S.A, Beckman, W.A., Mitchell, J.W., Duffie, J.A., Freeman, T.A. 2012. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison, USA.

Koschenz, M., Lehmann, B. 2000. Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, Dübendorf EMPA, 2000 – ISBN 3905594196

Luther, G. 2008: „Integrierte außenliegende Wandheizung – ein Verfahren zur Nutzung der...“ Patentschrift, DE10 2008 009 553 A1, <http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>

Luther, G. 2013: Außenliegende Luftheizung, Konzept, Modellierung und Analysen. Fachbericht für das Projekt LEXU II, Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken; <http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>

Luther, G., Altgeld, H. 2002: Die außenliegende Wandheizung, In: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 2002 (1), S. 8-15

Polifke, W., Kopitz, J. 2009: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden, 2.Auflage 2009, München, ISBN: 978-3-8273-7349-6

Schmidt, D. 2013. Modellierung einer außenliegenden Luftheizung (aLH) mit Hilfe der Software TRNSYS und Vergleich der Simulationsergebnisse mit Modellrechnungen in Excel und Messungen, Bachelor-Thesis, htw saar, Saarbrücken

Thornton, J. 2007: Ventilated, air cavity wall; Beschreibung zu TRNSYS-Type 1230, TESS LLC, University of Wisconsin, Madison, USA

VDI e.V. 2013: VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, 2013, Berlin, ISBN: 978-3-642-19980-6

Willems, W., Schild, K., Dinter, S. 2006: Handbuch der Bauphysik, Teil 1, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1. Auflage 2006, ISBN: 978-3-528-03982-0