

Christoph Schmidt  
Gerhard Luther  
Horst Altgeld

Stefan Maas  
Bodo Groß  
Frank Scholzen

DOI: 10.1002/bapi.201710028

# „Außenliegende Wandtemperierung“ – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandswand: theoretische Grundlagen und Kennwerte

Im Rahmen der Forschungsprojekte „LEXU“ und „LEXU II“ der IZES gGmbH wurde eine außenliegende Wandtemperierung (kurz „aWT“) entwickelt und erprobt. Bei der außenliegenden Wandtemperierung handelt es sich um ein niederexergetisches Temperierungssystem, das in Form von wasserführenden Rohren zwischen Bestandswand und neuem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) aufgebracht wird. Erweitert man den Wandaufbau um einen Luftspalt zwischen dem Temperierungssystem und dem WDVS, so kann die außenliegende Wandtemperierung mit einer außenliegenden Lufttemperierung ergänzt werden. Beide Systeme werden aktuell anhand eines Demonstrationsobjektes umgesetzt. Auch die theoretischen Grundlagen und Simulationsmöglichkeiten wurden in den Forschungsprojekten erarbeitet. Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf den theoretischen Grundlagen der aWT. Bei der aWT handelt es sich um einen Sonderfall eines thermoaktiven Bauteilsystems mit Fokus auf dem niederexergetischen Ansatz und mit der Möglichkeit einer minimalinvasiven Sanierung „von außen“.

**„Outlying wall tempering“ – LowEx-Utilisation for building refurbishment and thermal activation of the existing wall: Theoretical principles and characteristic values.** *The main part of the research projects „LEXU“ and „LEXU II“ from the IZES gGmbH is the development and the in situ testing of an outlying wall tempering (aWT). The aWT is a panel heating that is fitted between the existing wall and a new thermal insulation. Depending on the position of the panel heating in the wall cross-section, very low supply temperatures (LowEx) can be used. Moreover, the existing wall can be thermally activated. The installation of the aWT is possible from the outside, without removal of the tenants/user (minimally invasive). Through the creation of an air duct between the thermally active layer and the insulation, the aWT can be expanded to an outlying air tempering (aLT). External air can be tempered and provided to the room as tempered fresh air. The aLT is a further low exergy extension of the aWT. Both components (aWT & aLT) have been implemented at a wall of an office building. Besides the learning effects of the attachment processes and the practical testing the theoretical principles and the simulation possibilities of the aWT and the aLT were investigated in the project. The focus of this publication are the theoretical principles of the aWT in the context of TABS.*

## 1 Einleitung

Seit 2002 beschäftigt sich die IZES gGmbH im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte mit der Thematik der außenliegenden Wandtemperierung (aWT). Die Idee der aWT

wurde von Luther & Altgeld im Jahr 2002 [2] veröffentlicht. Bei der aWT dient eine fluidbasierte Flächentemperierung, eingebettet in einer Putzschicht unter einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) als niederexergetisches Heiz- und Kühlsystem. Aufbauend auf dieser Idee wurde in dem Projekt „Energieeinspar- und Kostensenkungspotenziale durch den Einsatz von außenliegenden Wandheizungssystemen für Niedertemperaturanwendungen“, kurz „LEXU“ (Fkz. 0327370T) von 2006 bis 2009 die aWT in verschiedenen Varianten (Rohrsysteme und Rohrabstände) und Anbringungsarten theoretisch, in Form von Musterplanungen und anhand einer Laborwand im Technikum der IZES gGmbH praktisch untersucht, siehe Altgeld et al. 2010 [1]. Das Folgeprojekt „Low Exergy Utilisation – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung“, kurz „LEXU II“, mit einer Laufzeit von 2012 bis 2018 beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung der aWT und der Erprobung an einem Demonstrationsobjekt. In einem Arbeitspaket des Projektes wurde als eine Weiterentwicklung der aWT eine außenliegende Lufttemperierung (aLT) entwickelt. Diese wurde ebenfalls anhand einer Laborwand im Technikum der IZES gGmbH getestet und deren Simulationsmöglichkeiten untersucht. Der schematische Wandaufbau der aWT ist in Bild 1 dargestellt. Die Erweiterung der aWT zur aLT ist in Bild 2 dargestellt. Bei der aLT wird zwischen Flächentemperierung und WDVS ein Luftspalt geschaffen. Durch diesen Luftspalt wird Außenluft unter Einsatz eines Ventilators dem Innenraum zugeführt und als temperierte Frischluft zur Verfügung gestellt. Der aktuelle Beitrag konzentriert sich auf die aWT. Die Ergebnisse der Umsetzung der aLT werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht. Das grundlegende Konzept der aLT und erste theoretische Analysen können Luther 2013 [7] entnommen werden.

## 2 Theoretische Betrachtung der aWT

Um das allgemeine Modell von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS) auf den Spezialfall der außenliegenden Wandtemperierung zu übertragen, wird ein beispielhafter Standard-Wandaufbau der aWT verwendet, siehe Bild 3 und Legende. Bei diesem Standard-Wandaufbau handelt es sich um eine massive, einschalige Bestandswand, bestehend aus Innenputz und Mauerwerk, auf die ein Wärmedämm-Verbundsystem aufgebracht wird. In die Schnittstelle zwischen Bestandswand und neuem WDVS wird in

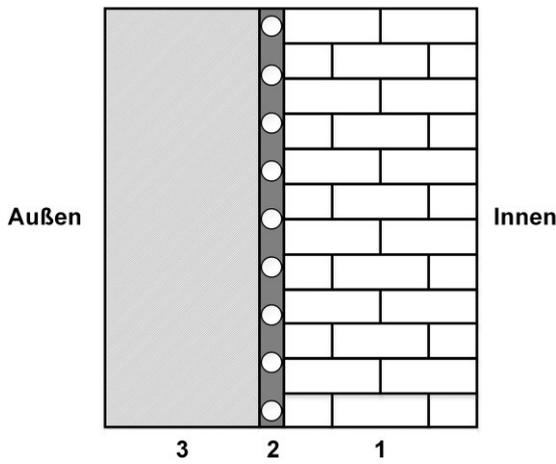


Bild 1. Vereinfachter schematischer Wandaufbau der aWT, mit Bestandswand (1), thermisch aktive Schicht (2) und WDVS (3)

Fig. 1. Simplified schematic wall structure of the aWT: Existing wall (1), thermally activated layer (2) and ETICS (3)

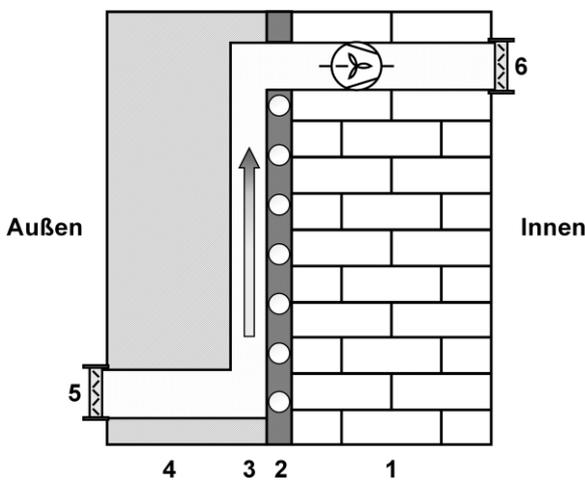


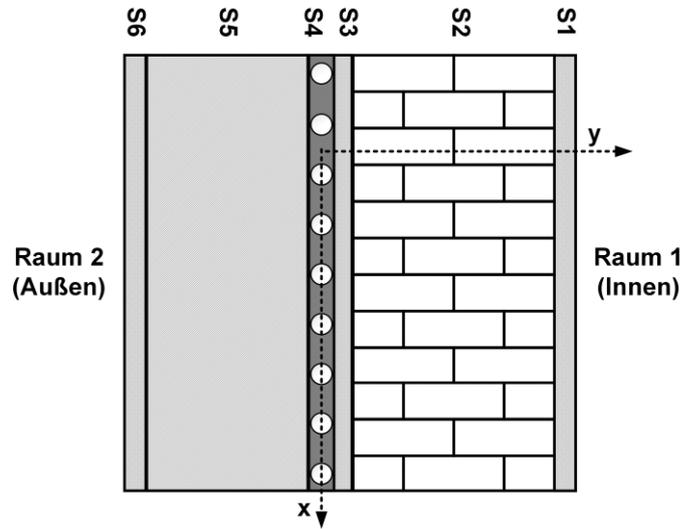
Bild 2. Vereinfachter schematischer Wandaufbau der aLT, mit Bestandswand (1), thermisch aktiver Schicht (2), Luftspalt (3), WDVS (4), Lufterinlass (5) und Luftauslass (6) jeweils mit Klappe

Fig. 2. Simplified schematic wall structure of the aLT: Existing wall (1), thermally activated layer (2), air gap (3), ETICS (4), air inlet (5) and air outlet (6), each with flap

einer zusätzlichen Putzschicht ein Temperierungssystem eingebracht. Das WDVS wird vereinfacht aus einer Schicht Wärmedämmung und einem Außenputz angenommen.

Das allgemeine Modell für TABS, entsprechend Koschenz und Lehmann [3], wird durch einige Änderungen an das Modell der aWT angepasst. Der Raum 1 wird als Innenraum definiert und Raum 2 als Außenluft/Umgebung, mit den entsprechenden Randbedingungen. Bei TABS handelt es sich normalerweise um horizontale Bauteile, bei der aWT handelt es sich jedoch um ein vertikales Bauteil, daher wird das Modell des Bauteils gedreht und die Anordnung der Achsen (x & y) getauscht, siehe Bild 4.

Auch das Gesamt-Widerstandsnetzwerk nach Koschenz und Lehmann [3] kann mit kleinen Änderungen für die aWT übernommen werden. Dies ist unabhängig davon, ob es sich bei der aWT um ein System mit Kapillarrohr-



Legende: Schichtaufbau für den dargestellten Standard-Fall der aWT

Typical layer structure of the aWT

Schicht	Name	Material	Bemerkung
S1	Innenputz	Gipsputz	Bestandswand
S2	Bestandswand	divers (z.B. Ziegel, Beton)	
S5	Außenputz (alt)	Kalkzementputz	neuer Wandaufbau
S4	Temperierungsebene	Klebermörtel mit Rohren	
S5	Wärmedämmung	divers (z.B. EPS)	
S6	Außenputz	Kalkzementputz	

Bild 3. Schichtaufbau des aWT-Modells. Die Bezeichnung der Schichten kann der Legende entnommen werden.

Fig. 3. Layer structure of the aWT wall model. The name of the layers is listed in Table 1.

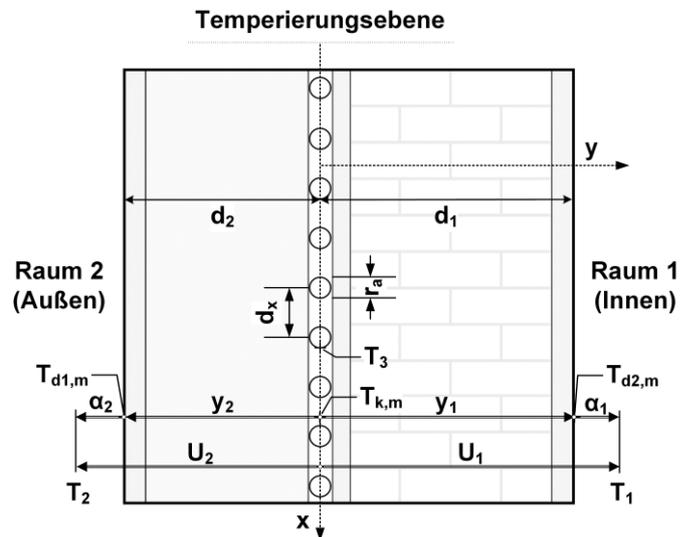


Bild 4. Übertragung des allgemeinen TABS-Modells auf den Spezialfall der außenliegenden Wandtemperierung.

Fig. 4. Transfer of the general TABS-model to the special case of the outlying wall tempering (aWT)

matten oder ein anderes Rohrsystem handelt. Einerseits ändert sich die Ausrichtung des Widerstandsnetzwerks und andererseits ändern sich die Schichtdicken ( $d_1$  und  $d_2$ ) und Widerstände ( $R_1$  und  $R_2$ ) zwischen der Temperierungsebene und den Räumen.

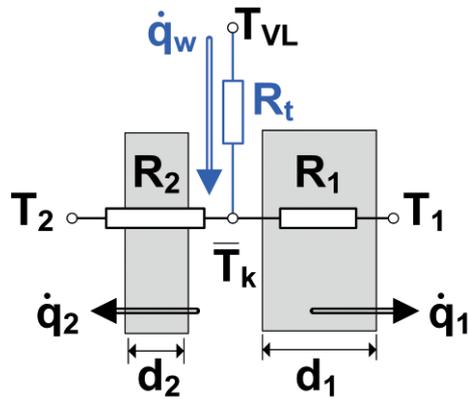


Bild 5. Übertrag des Gesamt-Widerstandsnetzwerks von TABS zwischen Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  und den beiden Temperaturen  $T_1$  (Innen) und  $T_2$  (Außen) auf den Spezialfall der aWT.

Fig. 5. Transfer of the complete resistance network between the supply temperature  $T_{VL}$  and  $T_1$  (inside) and  $T_2$  (outside) from TABS to the special case of the aWT

Im Folgenden werden die theoretischen, physikalischen Grundlagen der aWT für ein stationäres, eindimensionales Modell dargestellt, entsprechend Luther & Altgeld [2] und Luther [8]. Mit folgenden Annahmen:

- Homogene Wärmeübergänge und Temperaturverteilung in den Schichten.
- Alle thermischen Widerstände und Wärmeströme beziehen sich auf die Einheits-Wandfläche von  $1 \text{ m}^2$ . Daher wird auf die Bezeichnung „Wärmestromdichte“ verzichtet.
- Wärmekapazitätsstrom in der aWT ist so groß, dass es zu keiner Auskühlung über die betrachtete Fläche kommt (Vorlauftemperatur = Rücklauftemperatur).
- Die Rohre der aWT liegen so eng beieinander, dass die Knotentemperatur der mittleren Heiztemperatur entspricht, in diesem Fall also der Vorlauftemperatur ( $\bar{T}_k = T_{VL}$ ). Somit wird der Widerstand  $R_t$  ausgeschaltet bzw. überbrückt, also formal  $R_t = 0$  gesetzt. Somit ist es für die folgende Betrachtung auch nicht relevant, um welches Rohrsystem es sich bei der aWT handelt.

## 2.1 Ruhezustand der aWT

Als Ruhezustand bezeichnet man den Fall, dass die aWT nicht im Betrieb ist und somit keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf durch den Wandaufbau hat. Die Außenwand entspricht daher einer Außenwand ohne thermisch aktive Schicht. In diesem Fall ergibt sich der Temperaturverlauf durch die Wand entsprechend den einzelnen Schichtdicken und deren Wärmeleitfähigkeit bzw. der Wärmeübergangskoeffizienten an den Rändern der Außenwand.

### 2.1.1 Ruhewärmestrom

Bei konstanter Innentemperatur ( $T_1$ ) und Außentemperatur ( $T_2$ ) und dem Wärmedurchgangskoeffizient der gesamten Außenwand ( $U_{ges}$ ) ergibt sich der Verlustwärmestrom durch Transmission entsprechend Gl. (1) zu:

$$Q_0 = U_{ges} \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{Gl. (1)}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient der gesamten Außenwand ( $U_{ges}$ ) setzt sich dabei aus den beiden Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  zusammen. Der Widerstand  $R_1$  bezieht dabei den thermischen Widerstand von der Temperierungsebene nach Innen und  $R_2$  den entsprechenden Widerstand nach außen:

$$U_{ges} = 1/(R_1 + R_2) \quad \text{Gl. (2)}$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_{S1}}{\lambda_{S1}} + \frac{d_{S2}}{\lambda_{S2}} + \frac{0,5 \cdot d_{S3}}{\lambda_{S3}} \quad \text{Gl. (3)}$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d_{S4}}{\lambda_{S4}} + \frac{d_{S5}}{\lambda_{S5}} + \frac{0,5 \cdot d_{S5}}{\lambda_{S3}} \quad \text{Gl. (4)}$$

Der Verlustwärmestrom  $Q_0$  wird im Zusammenhang mit der aWT auch als „Ruhewärmestrom“ oder „Ruhestrom“ bezeichnet. Der Wärmestrom fließt, entsprechend dem Temperaturgradienten, von innen nach außen und ist über den Wandquerschnitt, unabhängig von der Betrachtungsebene, konstant.

### 2.1.2 Ruhetemperatur

Im Ruhezustand ergibt sich für die Knotentemperatur  $T_k$  eine bestimmte Temperatur, im Folgenden als „Ruhetemperatur“  $T_{k0}$  bezeichnet. Bei der Ruhetemperatur handelt es sich um die Temperatur, die sich in der Temperierungsebene im Ruhezustand (aWT nicht aktiv) entsprechend dem Temperaturverlauf durch die Außenwand einstellt. Da der Ruhestrom  $Q_0$  über die Außenwand konstant ist, lässt er sich auch über die folgenden Ansätze mit Bezug auf die Ruhetemperatur berechnen:

$$Q_0 = \frac{1}{R_2} \cdot (T_{k0} - T_2) \quad \text{Gl. (5)}$$

$$Q_0 = \frac{1}{R_1} \cdot (T_1 - T_{k0}) \quad \text{Gl. (6)}$$

Setzt man Gl. (1) in Gl. (6) ein, so ergibt sich für die Ruhetemperatur

$$T_{k0} = U_{ges} \cdot R_2 \cdot (T_1 - T_2) + T_2 \quad \text{Gl. (7)}$$

Geht man von einer nahezu konstanten Raumtemperatur ( $T_1 = 20 \text{ °C}$ ) aus, so ist die Ruhetemperatur einer Außenwand direkt abhängig von der herrschenden Außentemperatur ( $T_2$ ) und den konstanten Materialkennwerten  $R_2$  und  $U_{ges}$  (bei detaillierter Betrachtung ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient außen ebenfalls von der Temperatur und vom Wind abhängig). Wird eine Wärmedämmung in üblicher Stärke aufgebracht (16–20 cm), ist die Amplitude der Ruhetemperatur bei sich ändernder Außentemperatur jedoch relativ gering.

## 2.2 Betrieb der aWT

Nach Aktivierung der aWT wird der Wand der Heizstrom  $Q_w$  zugeführt bzw. aufgeprägt. Durch diesen Wärmestrom verändert sich die Ruhetemperatur  $T_{k0}$  in der Heizebene

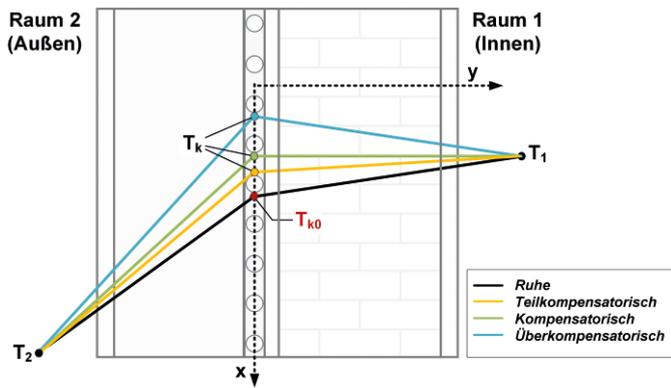


Bild 6. Schematische Änderung der Temperatur in der Heizebene ( $T_k$ ) durch den Betrieb der aWT und Zuordnung der Betriebsituationen

Fig. 6. Operation of the aWT: Schematic change of the temperature in the wall cross-section and assignment of the resulting operating situation of the aWT

und es ergibt sich eine neue Temperatur  $T_k$ . Relevant ist hier in erster Linie der resultierende Temperaturgradient zum Innenraum, siehe Bild 6. Entsprechend der neuen Temperatur in der Heizebene  $T_k$ , können drei verschiedene, generelle Betriebsweisen der aWT unterschieden werden:

- Teilkompensatorischer Betrieb:  $T_{k0} < T_k < T_1$
- Kompensatorischer Betrieb:  $T_{k0} < T_k = T_1$
- Überkompensatorischer Betrieb:  $T_{k0} < T_k > T_1$

Die resultierenden Wärmeströme in der Wand können auf zwei unterschiedlichen Wegen berechnet werden. Ein Überblick ist in Bild 7 dargestellt. Hier ist die Richtung der Wärmeströme zu beachten, da diese sich teilweise überlagern. Die Richtungspfeile in Bild 7 bzw. in den folgenden Annahmen wurden so gewählt, dass als positiv gezählt werden:

- Der Ruhestrom  $Q_0$  von innen nach außen.
- Der in der Temperierungsebene eingebrachte Wärmestrom  $Q_w$ .

- Die sonstigen Wärmeströme in Richtung von der Temperierungsebene weg.

Der eingebrachte Wärmestrom  $Q_w$  teilt sich auf in einen Anteil, der nach innen fließt ( $Q_{w,1}$ ) und einen Anteil, der als Verlust zur Umgebung hin abfließt ( $Q_{w,2}$ ). Gleichzeitig muss der eingebrachte Wärmestrom jedoch auch der Summe der resultierenden Wärmeströme ( $Q_1$  &  $Q_2$ ) entsprechen.

$$Q_w = Q_{w,1} + Q_{w,2} \quad \text{Gl. (8)}$$

$$Q_w = Q_1 + Q_2 \quad \text{Gl. (9)}$$

In der folgenden Betrachtung wird also unterschieden in theoretische Wärmeströme und resultierende Wärmeströme:

#### Theoretische Wärmeströme

Bei den beiden Wärmeströmen ( $Q_{w,1}$  und  $Q_{w,2}$ ) handelt es sich nicht um real existierende (messbare) Wärmeströme, sondern um theoretisch berechenbare. In dem Bauteil werden sich entsprechend dem Überlagerungsprinzip die (messbaren) Wärmeströme  $Q_1$  und  $Q_2$  einstellen. Der Begriff „Überlagerungsprinzip“ bedeutet hier, dass der ungestörte Temperaturverlauf bzw. der Ruhewärmestrom ( $Q_0$ ) durch den neu aufgeprägten Heiz-Wärmestrom ( $Q_w$ ) und dessen Aufteilung nach innen ( $Q_{w,1}$ ) und außen ( $Q_{w,2}$ ) überlagert wird. Diese Überlagerung kann nach dem Superpositionsprinzip auch getrennt betrachtet/berechnet werden:

- 1) Betrachtung des Ruhewärmestroms  $Q_0$  mit der Temperaturdifferenz ( $T_1 - T_2$ ) und dem Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{ges}$  (siehe vorheriger Abschnitt).
- 2) Berechnung der Aufteilung des Wärmestroms  $Q_w$  in  $Q_{w,1}$  und  $Q_{w,2}$ . Die Aufteilung berechnet sich dabei nach den Kirchhoffschen Regeln nach dem jeweiligen Anteil am Gesamtwiderstand ( $R_1 + R_2$ ) und **völlig unabhängig** von der Temperaturdifferenz nach innen/außen. Der über die Temperierungsebene zugeführte Heizwär-

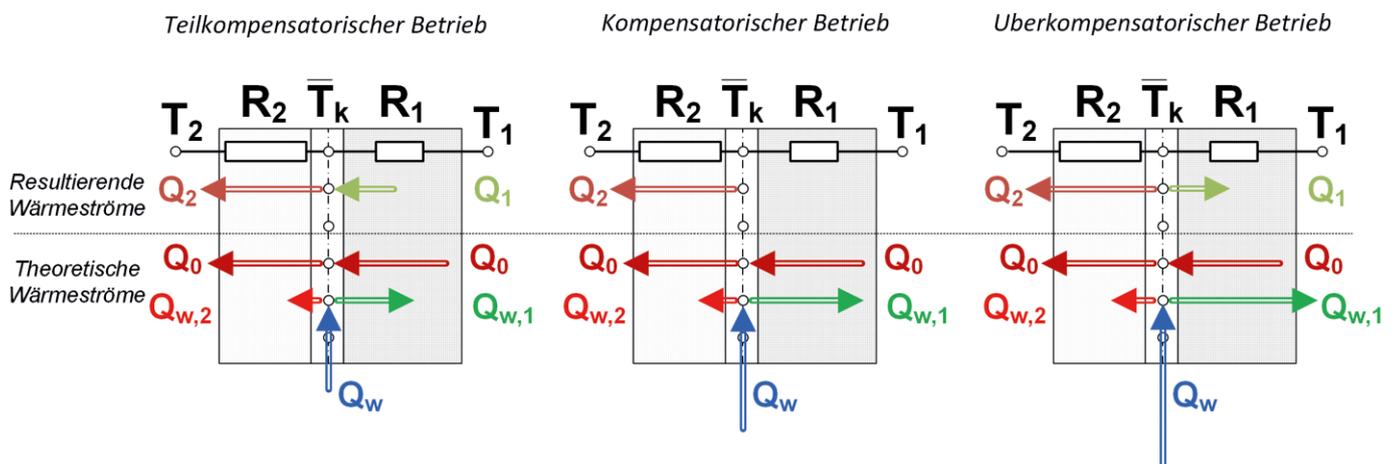


Bild 7. Schema der theoretischen und resultierenden Wärmeströme für den teilkompensatorischen Betrieb, den kompensatorischen Betrieb und den überkompensatorischen Betrieb. Die Länge der Pfeile (ohne Pfeilspitze) ist skaliert entsprechend den Zahlenwerten von Nr. 4, 5 & 6 des Beispiels unter 2.4.

Fig. 7. Schematic drawing of the theoretically and resulting heat flows of the wall tempering for the partly compensatory, the compensatory and the over compensatory operation mode. The length of the arrows (without arrowhead) is scaled according to the numerical values of the example in section 2.4 (Nr. 4, 5 & 6).

mestrom  $Q_w$  teilt sich in die beiden theoretischen Wärmeströme  $Q_{w,1}$  und  $Q_{w,2}$  auf, entsprechend der Widerstände  $R_1$  bzw.  $R_2$  in Relation zum gesamten Widerstand  $R_1+R_2$ .

$$Q_{w,1} = Q_w \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = Q_w \cdot R_2 \cdot U_{\text{ges}} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$Q_{w,2} = Q_w \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = Q_w \cdot R_1 \cdot U_{\text{ges}} \quad \text{Gl. (11)}$$

### Resultierende Wärmeströme

Entsprechend dem Schema in Bild 7 ergeben sich die resultierenden Wärmeströme durch Überlagerung der theoretischen Wärmeströme im Bauteil:

$$Q_1 = Q_{w,1} - Q_0 \quad \text{Gl. (12)}$$

$$Q_2 = Q_{w,2} + Q_0 \quad \text{Gl. (13)}$$

Der Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass die Kerntemperatur  $T_k$  für die Berechnung nicht benötigt wird und der aufgeprägte (eingebrachte) Heiz-Wärmestrom  $Q_w$  einfach messbar ist.

Die beiden messbaren Wärmeströme  $Q_1$  und  $Q_2$  können jedoch auch über die Kerntemperatur  $T_k$  und die jeweiligen Widerstände ( $R_1$  bzw.  $R_2$ ) berechnet werden:

$$Q_w = Q_1 + Q_2 \quad \text{Gl. (14)}$$

$$Q_1 = \frac{(T_k - T_1)}{R_1} \quad \text{Gl. (15)}$$

$$Q_2 = \frac{(T_k - T_2)}{R_2} \quad \text{Gl. (16)}$$

### 2.2.1 Teilkompensatorischer Betrieb

Im teilkompensatorischen Betrieb liegt die Knotentemperatur in der Temperierungsebene  $T_k$  oberhalb der Ruhetemperatur  $T_{k0}$ , jedoch unterhalb der Raumtemperatur  $T_1$ . Durch den eingebrachten Heizwärmestrom werden die Transmissionswärmeverluste verringert bzw. teilweise kompensiert. Es findet eine Verlagerung der Wärmeverluste vom Raum in die Temperierungsebene statt. Ein Vorteil sind die geringen Temperaturanforderungen an das Heizmedium: Im teilkompensatorischen Betrieb können Fluidtemperaturen im Temperaturbereich unterhalb der Raumtemperatur  $T_1$  ( $< 20^\circ\text{C}$ ) aber oberhalb der Ruhetemperatur  $T_{k0}$  zur Verringerung der Transmissionswärmeverluste nutzbar gemacht werden. Charakteristisch für den teilkompensatorischen Betrieb ist, dass der Wärmestrom  $Q_1$  negative Werte annimmt, da  $Q_{w,1}$  betragsmäßig kleiner  $Q_0$  ist, siehe Bild 7. Es verbleibt somit ein „Rest“ an Transmissionswärmeverlusten, die aus dem Raum 1 (Innenraum) stammen.

### 2.2.2 Kompensatorischer Betrieb

In diesem Betriebsmodus entspricht die Kerntemperatur der Temperierungsebene  $T_k$  der Innentemperatur  $T_1$ .

Durch diese Bedingung eliminiert sich der Temperaturgradient nach Innen. Der Teilwärmestrom  $Q_{w,1}$  entspricht dem Ruhewärmestrom  $Q_0$ . Es findet somit kein Verlustwärmestrom mehr vom Raum in das Bauteil statt. Die Transmissionswärmeverluste der aktivierten Wandflächen werden über die Temperierungsebene kompensiert. Der erforderliche Heiz-Wärmestrom  $Q_w$  ist hierbei um  $Q_{w,2}$  größer als der Ruhewärmestrom  $Q_0$ .

Zur vollständigen Kompensation der Transmissionswärmeverluste aus dem Innenraum wird der Heiz-Wärmestrom  $Q_w$  benötigt. Dieser wird als Kompensationswärmestrom  $Q_{w,k}$  bezeichnet und wird entsprechend Gl. (19) berechnet.

$$Q_1 = 0 \Rightarrow Q_{w,1} = Q_0 \quad \text{Gl. (17)}$$

$$Q_{w,k} \cdot R_2 \cdot U_{\text{ges}} = U_{\text{ges}} \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{Gl. (18)}$$

$$Q_{w,k} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_2} \quad \text{Gl. (19)}$$

### 2.2.3 Überkompensatorischer Betrieb

Die aWT kann nicht nur zur Kompensation der Transmissionswärmeverluste eingesetzt werden, sondern auch zur aktiven Temperierung des Innenraumes. Hierfür muss dem Raum ein Heizwärmestrom über die Innenoberfläche zur Verfügung gestellt werden. Dieser zusätzliche, über die Kompensation der Transmissionswärmeverluste hinausgehende ( $\rightarrow$  überkompensatorische), Wärmestrom kann zum Ausgleich von Lüftungs- oder Infiltrationswärmeverlusten oder Transmissionswärmeverlusten von nicht aktivierten Außenflächen (Fenster, Randflächen usw.) genutzt werden. Diese zusätzliche Wärme wird durch eine Erhöhung der Kerntemperatur  $T_k$  über die Raumtemperatur  $T_1$  hinaus „erkauft“. In diesem Fall ist  $Q_{w,1}$  größer als  $Q_0$  und es ergibt sich ein positiver Wert für  $Q_1$ .

Soll ein bestimmter effektiver Heizwärmestrom  $Q_1$  in den Raum erreicht werden, so kann der notwendige Temperaturhub  $\Delta T_k$  in der Temperierungsebene über die Raumtemperatur hinaus folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Delta T_{k,1} = T_k - T_1 \quad \text{Gl. (20)}$$

$$\text{Mit } Q_1 = \frac{(T_k - T_1)}{R_1} \Rightarrow \Delta T_{k,1} = Q_1 \cdot R_1 \quad \text{Gl. (21)}$$

### 2.3 Ausnutzungsfaktor bzw. effektiver energetischer Wirkungsgrad der aWT

In Luther & Altgeld [2] wurde für die außenliegende Wandtemperierung ein Ausnutzungsfaktor  $\eta_{aWT}$  definiert. Für diesen Ausnutzungsgrad wird der nach innen fließende, theoretische Wärmestrom  $Q_{w,1}$  als Nutzen definiert und der gesamte über die Temperierungsebene zugeführte Wärmestrom  $Q_w$  als Aufwand. Dementsprechend ergibt sich der Ausnutzungsfaktor zu:

$$\eta_{aWT} = \frac{Q_{w,1}}{Q_w} \quad \text{Gl. (22)}$$

U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Dämmstärke [mm]																	
	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1.0	25%	37%	46%	53%	58%	62%	68%	73%	76%	79%	81%	83%	84%	85%	86%	87%	88%	89%
1.1	27%	40%	49%	55%	60%	64%	70%	75%	78%	80%	82%	84%	85%	86%	87%	88%	89%	90%
1.2	29%	42%	51%	57%	62%	66%	72%	76%	79%	82%	84%	85%	86%	88%	88%	89%	90%	91%
1.3	30%	44%	53%	59%	64%	68%	74%	78%	81%	83%	85%	86%	87%	88%	89%	90%	91%	91%
1.4	32%	46%	55%	61%	66%	70%	75%	79%	82%	84%	86%	87%	88%	89%	90%	91%	91%	92%
1.5	34%	48%	57%	63%	68%	71%	77%	80%	83%	85%	87%	88%	89%	90%	91%	91%	92%	92%
1.6	35%	49%	58%	65%	69%	73%	78%	81%	84%	86%	87%	89%	90%	90%	91%	92%	92%	93%
1.7	37%	51%	60%	66%	71%	74%	79%	82%	85%	87%	88%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%
1.8	38%	52%	61%	67%	72%	75%	80%	83%	86%	87%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%	94%
1.9	40%	54%	63%	69%	73%	76%	81%	84%	86%	88%	89%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%
2.0	41%	55%	64%	70%	74%	77%	82%	85%	87%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%	94%	94%
2.1	42%	57%	65%	71%	75%	78%	83%	85%	88%	89%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%	95%
2.2	43%	58%	66%	72%	76%	79%	83%	86%	88%	90%	91%	92%	92%	93%	94%	94%	94%	95%
2.3	45%	59%	67%	73%	77%	80%	84%	87%	89%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%	95%	95%
2.4	46%	60%	68%	74%	78%	81%	85%	87%	89%	90%	92%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%
2.5	47%	61%	69%	75%	79%	81%	85%	88%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%	95%	95%	95%
2.6	48%	62%	70%	76%	79%	82%	86%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%	96%
2.7	49%	63%	71%	76%	80%	83%	86%	89%	90%	92%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	96%	96%
2.8	50%	64%	72%	77%	81%	83%	87%	89%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%	96%	96%
2.9	51%	65%	73%	78%	81%	84%	87%	89%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	96%	96%	96%
3.0	52%	66%	74%	78%	82%	84%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	95%	95%	95%	96%	96%	96%

Bild 8. Wirkungsgrad der aWT in Abhängigkeit des U-Wertes der Bestandswand und der Dämmstärke des WDVS (für das WDVS wurde die Wärmeleitgruppe 040 angenommen). Zusätzlich zu der Dämmschicht wurde für R<sub>2</sub> noch eine 20 mm starke Putzschicht und der äußere Wärmeübergang mit 0.04 (m<sup>2</sup>\*K)/W angesetzt.

Fig. 8. Efficiency of the aWT depending on the U-value of the existing wall and the thickness of the new ETICS (WLG 040). For R<sub>2</sub> a plaster layer with 20 mm and the external heat transfer (0.04 (m<sup>2</sup>\*K)/W) was estimated, beside to the insulation layer.

Im Laufe der Projektlaufzeit hat sich für den Ausnutzungsfaktor die Bezeichnung „Wirkungsgrad“ bzw. „energetischer Wirkungsgrad“ der aWT etabliert.

Unter Verwendung von Gl. (10) und Gl. (2) lässt sich der Ausnutzungsfaktor bzw. der effektive, energetische Wirkungsgrad der aWT alleine auf die Wärmeübergangswiderstände und beinhaltenen Wärmeübergangskoeffizienten zurückführen:

$$\eta_{aWT} = \frac{Q_{w,I}}{Q_w} = \frac{Q_w \cdot \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot R_2}{Q_w} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Gl. (23)}$$

$$= R_2 \cdot U_{ges}$$

Zusammengefasst, hängt der Wirkungsgrad der aWT also alleine vom Verhältnis der thermischen Widerstände ab, unabhängig von der Temperaturdifferenz und dem Heizwärmestrom Q<sub>w</sub>.

Durch Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes R<sub>2</sub> kann der Wirkungsgrad der aWT beliebig nahe an 1 bzw. 100% gebracht werden. In Bild 8 ist für Bestandswände mit einem U-Wert von 1 bis 3 W/(m<sup>2</sup>\*K) der resultierende energetische Wirkungsgrad der aWT aufgetragen, bei Anbringung eines WDVS (WLG 040) mit einer Dämmstärke von 10 bis 300 mm.

Entsprechend der aktuellen Version der DIN EN 1264 (Teil 4, Tabelle 1) [4] wird für Wandheizungen,

die an die Außenluft grenzen, ein Wärmeleitwiderstand von 2 (m<sup>2</sup>\*K)/W zwischen den Leitungen und der Umgebung gefordert (entspricht R<sub>2</sub>). Für das Beispiel in Bild 8 wird die Forderung aus der Norm ab einer Dämmstärke von 80 mm erfüllt. Dämmstärken darunter wären demzufolge nicht zulässig. Es ist ersichtlich, dass bei einer Dämmstärke von 80 mm nur relativ geringe Wirkungsgrade erzielt werden, insbesondere bei einem U-Wert der Bestandswand kleiner 2,0 W/(m<sup>2</sup>\*K). Betreffend die außenliegende Wandtemperierung wäre hier ein zusätzlicher Bezug auf den Wärmeleitwiderstand nach Innen (R<sub>1</sub> bzw. U-Wert der Bestandswand) sinnvoll.

#### 2.4 Zahlenbeispiel

Für folgende Konfiguration:

Temperaturen:

- Raumtemperatur, T<sub>1</sub>: 20 °C
- Außentemperatur, T<sub>2</sub>: 0 °C

Wärmeübergangskoeffizienten

- Innen, α<sub>1</sub>: 8 W/(m<sup>2</sup>\*K)
- Außen, α<sub>2</sub>: 23 W/(m<sup>2</sup>\*K)

Wandaufbau: Sanierte Außenwand mit einem U-Wert von 0,23 W/(m<sup>2</sup>\*K):

**Tabelle 1. Schichtaufbau der sanierten und aktivierten Außenwand; Gesamtdicke: 0,57 m**  
**Table 1. Layer structure of the refurbished and activated external wall; total thickness: 0,57 m**

Bezeichnung	Material	Dicke [m]	$\lambda$ [W/(m*K)]	Schicht
Innenputz	Gipsputz	0,01	0,70	S1
Mauerwerk	Vollziegel	0,30	0,81	S2
Außenputz (alt)	Kalkzementputz	0,02	1,00	S3
Rohrebene	Klebemörtel	0,02	1,00	S4
Wärmedämmung	EPS	0,15	0,04	S5
Außenputz (neu)	Kalkzementputz	0,02	1,00	S6

### 2.4.1 Modellierung der aWT mittels Software für zweidimensionalen Wärmedurchgang

Die aWT wird in der Software HEAT [5] über Rohrleitungen mit konstanter Temperatur innerhalb des Bauteils berechnet. Die Software wird benutzt um für einen definierten Rohrabstand (3 cm) eine realistische Kerntemperatur in Folge zweidimensionaler Wärmeleitung zu berechnen. Diese Kerntemperatur entspricht der mittleren Temperatur der Temperierungsebene  $T_{k,m}$  als Funktion der Vor- und Rücklauf Temperatur und der Rohrparameter. Dabei wird für das Beispiel in HEAT weder der Wärmeübergang vom Fluid an den Rohrmantel noch die Wärmeleitung durch den Rohrmantel betrachtet. Der Widerstand  $R_t$  (siehe Bild 5) zwischen der Vorlauf Temperatur und der Kerntemperatur ist somit vor allem von dem Rohrabstand abhängig (bei Betrachtung einer konstanten Temperatur im Rohr). Der Abstand der Rohrleitungen wurde dabei mit 3 cm so gewählt, dass eine nahezu homogene Temperaturverteilung in der Temperierungsebene vorliegt und  $T_{k,m}$  somit nahezu der eingestellten Vorlauf Temperatur der aWT,  $T_{aWT}$ , entspricht, stellvertretend für ein Kapillarrohrsystem. Ausgehend von der errechneten Kerntemperatur bzw. bei Ansetzung einer definierten Kerntemperatur, können die weiteren Berechnungsschritte auch von Hand erfolgen.

#### Ergebnisse

Die Ergebnisse können Tabelle 2 entnommen werden. Es bestätigt sich, dass der Wirkungsgrad der aWT nicht abhängig von der Temperatur der Heizebene (bzw. der Vorlauf Temperatur der aWT) ist, sondern bei gegebenem Wandaufbau konstant ist (hier 87 %). Die verschiedenen Betriebssituationen sind in der Tabelle farblich markiert: Teilkompensatorischer Betrieb, Kompensatorischer Betrieb und Überkompensatorischer Betrieb. Im kompensatorischen Betrieb ist der Wärmestrom nach Innen  $Q_1$  nahezu Null und die innere mittlere Oberflächentemperatur  $T_{d1,m}$  entspricht der Raumtemperatur  $T_1$ . Im überkompensatorischen Betrieb bei  $T_{aWT} > 20$  °C, stellt sich ein positiver Wärmestrom in den Raum ein. Zudem steigt die innere und äußere Oberflächentemperatur ( $T_{d1,m}$  &  $T_{d2,m}$ , siehe Bild 4) an. Dem gegenüber stehen erhöhte Verluste über die Außenfläche ( $Q_2$ ). Der Betrieb der aWT ist in jedem Betriebsfall mit erhöhten Verlusten verbunden, dies erklärt sich durch die Lage der Temperierungsebene im Wandquerschnitt. Bei abschließlicher Betrachtung des Bauteils, ohne systemi-

schen Ansatz, können diese Verluste jedoch nicht bewertet werden.

### 3 Mögliche Einsatzgebiete der aWT

Der wesentliche technische Vorteil der außenliegenden Wandtemperierung besteht im Einsatz sehr niedriger Fluidtemperaturen.

Aufgrund des Temperaturniveaus bietet sich die aWT insbesondere für den Einsatz mit niederexergetischen Komponenten an (z.B. Solarthermie und/oder Wärmepumpe). Hier konnte in ersten Simulationsstudien gezeigt werden, dass durch den Einsatz der aWT der Kollektorwirkungsgrad beim Einsatz von Solarthermie generell gesteigert werden kann, siehe Altgeld et al. [1]. Systematisch betrachtet, wird der aWT generell eher die Rolle einer Grundlastheizung zugeordnet. Durch die niedrigen Heiztemperaturen ergibt sich im Grundlastbetrieb, ähnlich wie bei Fußbodenheizungen, ein Selbstregelleffekt. Erste Simulationsergebnisse zeigen jedoch, dass auch eine alleinige Beheizung über die aWT möglich ist, gerade im Zusammenspiel mit der schnell regelbaren Lufttemperierung (aLT). Der Einsatz der aWT führt im Endeffekt auch zu erhöhten Oberflächentemperaturen auf der Innenoberfläche der Außenwand. Dieser Effekt wird im Zusammenhang mit der thermischen Behaglichkeit detaillierter betrachtet. Auch für die Verhinderung bzw. Sanierung von Bauschäden (wie z.B. Feuchteschäden) ist die aWT prinzipiell geeignet.

Schließlich weist auch die Installation der aWT einen wesentlichen Vorteil gegenüber vergleichbaren, innenliegenden Systemen auf: Die aWT kann „von außen“ installiert werden, bei weitgehender Störungsfreiheit der Bewohner bzw. mit minimalen Eingriffen in den bewohnten Bereich. Im Zuge der Installation der aWT können auch andere Anschlüsse (Haustechnik, Strom, Wasser) von außen neu installiert und verlegt werden. Es handelt sich somit um eine minimalinvasive Sanierungsmöglichkeit für die thermische Hülle und die Anlagentechnik.

Als Nachteil der aWT ist der statische Wirkungsgrad der aWT von rund 90 % (bei realistischen Dämmstärken) zu nennen, siehe Bild 8. Zudem benötigt die aWT, je nach Betriebsweise, anspruchsvolle Regelstrategien, da es sich um ein sehr träges Heizsystem handelt (unter anderem abhängig vom U-Wert der Bestandswand). Vereinfacht ausgedrückt: Je höher der angestrebte Deckungsanteil der aWT an der gesamten Heizwärme, desto anspruchsvoller die notwendigen Regelstrategien. Dies bedeutet umgekehrt

**Tabelle 2. Berechnungsergebnisse für konstante Vorlauftemperaturen der aWT bis 35 °C**  
**Table 2. Calculation results for constant flow temperatures of the aWT, up to 35 °C**

Nr.	$T_{aWT}$ [°C]	$T_{k,m}$ [°C]	$T_{d1,m}$ [°C]	$T_{d2,m}$ [°C]	$Q_1$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_2$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_w^{4)}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\eta_{aWT}$ [%]
1 <sup>0)</sup>	/	/	15.5	1.4	-34.8	34.8	/	/
2 <sup>1)</sup>	/	17.5 <sup>2)</sup>	19.4	0.2	-4.7 <sup>3)</sup>	4.7	/	/
3	18.0	18.0	19.5	0.2	-3.7	4.8	1.1	87
4	19.0	19.0	19.8	0.2	-1.9	5.1	3.2	87
5	20.0	20.0	20.0	0.2	-0.06	5.4	5.3	87
6	21.0	21.0	20.2	0.2	1.8	5.6	7.4	87
7	22.0	21.9	20.5	0.2	3.6	5.9	9.5	87
8	23.0	22.9	20.7	0.2	5.4	6.2	11.5	87
9	24.0	23.9	20.9	0.3	7.2	6.4	13.6	87
10	25.0	24.9	21.2	0.3	9.0	6.7	15.7	87
11	26.0	25.9	21.4	0.3	10.8	6.9	17.8	87
12	27.0	26.9	21.6	0.3	12.6	7.2	19.8	87
13	28.0	27.9	21.9	0.3	14.5	7.5	21.9	87
14	29.0	28.8	22.1	0.3	16.3	7.7	24.0	87
15	30.0	29.8	22.4	0.3	18.1	8.0	26.1	87
16	31.0	30.8	22.6	0.3	19.9	8.3	28.2	87
17	32.0	31.8	22.8	0.3	21.7	8.5	30.2	87
18	33.0	32.8	23.1	0.4	23.5	8.8	32.3	87
19	34.0	33.8	23.3	0.4	25.3	9.1	34.4	87
20	35.0	34.8	23.5	0.4	27.1	9.3	36.5	87

<sup>0)</sup> bei dieser Variante handelt es sich um die Bestandswand ohne Wärmedämmung, also unsaniert

<sup>1)</sup> bei dieser Variante handelt es sich um die Referenzvariante ohne aWT

<sup>2)</sup> Entspricht der Ruhetemperatur  $T_{k0}$

<sup>3)</sup> Entspricht dem Ruhewärmestrom  $Q_0$

<sup>4)</sup> Berechnet aus  $Q_1 + Q_2$

auch, dass im Grundlastbetrieb einfache Regelstrategien ausreichend sind.

#### 4 Demonstrator der außenliegenden Wandtemperierung

Zur Demonstration der praktischen Umsetzbarkeit der theoretischen Ergebnisse der Forschungsprojekte wurde Mitte 2015 mit der Ausrüstung eines Demonstrator-Gebäudes mit der aWT und aLT begonnen. Hierbei handelt es sich um ein Bürogebäude aus den 60er Jahren auf dem Campus der Universität des Saarlandes. Eine Fassade des Gebäudes wurde mit ca. 140 m<sup>2</sup> der aWT und ca. 6 m<sup>2</sup> der aLT (ausgelegt auf einen dahinterliegenden Büroraum) belegt. Anhand des Demonstrators sollte einerseits der minimalinvasive Aufbau/Anbringung der aWT getestet werden (zusätzlich der Schichtaufbau, die Schnittstellen und die Systemkosten) und andererseits wird die aWT um ein komplettes, niederexergetisches Temperierungssystem, bestehend aus Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Kollektoren, erweitert.

Die Erstellung der Fassade mit der aWT/aLT konnte bereits abgeschlossen werden. Die aWT wurde für den Demonstrator aus einzelnen, maßgefertigten Kapillarrohrmatten erstellt, siehe Bild 9. Das niederexergetische Temperierungssystem befindet sich derzeit noch im Aufbau. Die Gesamtanlage soll zur Heizperiode 2017/18 in Betrieb gehen. Die Ergebnisse der praktischen Umsetzung der

aWT/aLT und das parallel ermittelte technische (Schichtaufbau) und wirtschaftliche (Systemkosten) Optimierungspotential sollen zeitnah veröffentlicht werden. Generell konnte die außenliegende Wandtemperierung jedoch ohne größere Probleme entsprechend den theoretischen Voruntersuchungen und der Belegungsplanung an dem Demonstrator umgesetzt werden.

#### 5 Ausblick

##### 5.1 Umsetzung und Ergebnisse vom Demonstrationsobjekt

In 2017 und 2018 wird der Demonstrator jeweils über eine Heiz- und Kühlperiode begleitet und die Messergebnisse ausgewertet. Neben der außenliegenden Wandtemperierung wird auch das komplette niederexergetische Temperierungssystem aus Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Kollektoren analysiert und ausgewertet. Im Fokus stehen hier neben den Grundfunktionen der aWT vor allem die direkte Verbindung von PVT-Kollektoren und Wandtemperierung und damit der niederexergetische Ansatz der aWT.

##### 5.2 Außenliegende Lufttemperierung (aLT)

Durch die Umsetzung einer Feldtestfläche der aLT an dem Demonstrator können weiterführende Erkenntnisse zu Aufbau, Konzeption und Umsetzung der aLT gewonnen werden. Bei der aLT handelt es sich um eine niederexergetische



*Bild 9. Einputzen der Kapillarrohrmatten mit Klebemörtel (oben) und Glattziehen desselbigen auf der Fassade des Demonstrators (unten)*

*Fig. 9. Mounting of the capillary tubes and plastering with adhesive mortar at the facade of the demonstrator building*

tische Erweiterung der aWT, da noch niedrigere Fluidtemperaturen nutzbar gemacht werden können (Vortemperierung von Frischluft und Rückgewinnung der Transmissionswärmeverluste) und gleichzeitig die träge aWT durch eine schnell regelbare aLT ideal ergänzt wird. Auch der Betrieb der aLT wird über die Projektlaufzeit messtechnisch begleitet.

### 5.3 Potentialstudien mittels Systemsimulationen

Da mit der Software TRNSYS [9] ein für die vorliegenden Anwendungsfälle validiertes Simulationswerkzeug zur Ver-

fügung steht, siehe Schmidt et. al. 2016 [6], können aufbauend auf den Ergebnissen des Demonstrators extrapolierende Potentialstudien der aWT und aLT mit Hilfe von dynamischen Simulationen durchgeführt werden.

### Danksagung

Die Projekte LEXU und LEXU II wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags unter den Fördernummern: 0327370Y/T. Wir möchten uns an dieser Stelle für die Unterstützung bedanken.

### Literatur:

- [1] Altgeld, H.; Mahler, M.; Cavellius, R.; Horst, J.; Dürnhöfer, A.; Boettcher, J.: Energieeinspar- und Kostensenkungspotenziale durch den Einsatz von außen liegenden Wandheizungssystemen (aWH) für Niedertemperaturanwendungen, Endbericht Projekt LEXU, Fkz. 0327370T (2010), Saarbrücken
- [2] Luther, G.; Altgeld, H.: Die außenliegende Wandheizung, In: gi, 2002 (1), S. 8–15. <http://fze.uni-saarland.de/ThOptHeizen.htm>, Kapitel 2 „Außenliegende Wandheizung“
- [3] Koschenz, M.; Lehmann, B.: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, Dübendorf EMPA, 2000, ISBN: 3905594196
- [4] DIN EN 1264:1-5 „Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung“; Beuth-Verlag GmbH, Berlin
- [5] Blomberg, T.: HEAT 2 – A PC-program for heat transfer in two dimensions, Building Technology Group, M.I.T. (2000), Cambridge/Dept. of Building Physics, Lund, Sweden.
- [6] Schmidt, C., Altgeld, H., Groß, B.; Luther, G., Schmidt, D.: LEXU II – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung, In: Proceedings of CESBP/Bau-Sim 2016, S.843–850.
- [7] Luther, G.: Endbericht zum theoretischen Teil von Arbeitspaket 3 im Projekt LEXU II, Außenliegende Luftheizung, Konzept, Modellierung und Analysen, Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken (2013). Verfügbar über: <http://fze.uni-saarland.de/ThOptHeizen.htm>.
- [8] Luther, G.: Fachbericht zum Forschungsbericht LEXU: „Das thermische Verhalten der Außenwandheizung (aWH) – Theoretische Grundlagen“, Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken (2008). Verfügbar über: <http://fze.uni-saarland.de/ThOptHeizen.htm>.
- [9] Klein, S. A.: TRNSYS – A Transient System Simulation Program, Version 17, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 2012.

### Autoren:

M.Eng. Christoph Schmidt, [schmidt@izes.de](mailto:schmidt@izes.de)  
 Prof. Dr.-Ing. Horst Altgeld, [altgeld@izes.de](mailto:altgeld@izes.de)  
 Dr. Bodo Groß, [gross@izes.de](mailto:gross@izes.de)  
 IZES gGmbH, Altenkesseler Str. 17, Geb. A1, 66115 Saarbrücken  
 Dr. Gerhard Luther, [luther.gerhard@ingenieur.de](mailto:luther.gerhard@ingenieur.de)  
 Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Experimentalphysik – Bau E2.6, 66123 Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas, [stefan.maas@uni.lu](mailto:stefan.maas@uni.lu)  
 Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, [frank.scholzen@uni.lu](mailto:frank.scholzen@uni.lu)  
 Université du Luxembourg, Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation, 6, rue Richard Coudenhove-Kalergi, L-1359 Luxembourg