

Schlussbericht



zum Vorhaben:

„LEXU II - Low Exergy Utilisation - Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung – Feldtest CO₂-Wärmepumpe mit Eisspeicher“

Zuwendungsempfänger: IZES gGmbH

Förderkennzeichen: 0327370Y

Laufzeit: 01.01.2012 – 31.12.2019

Gesamtprojektleitung: IZES gGmbH, Herr Prof. Dr.-Ing. Horst Altgeld

Autoren: Dr. Bodo Groß, Dr.-Ing. Christoph Schmidt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Saarbrücken, den 08. Mai 2020

Inhalt

Inhalt	2
I Kurze Darstellung	3
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
2.1 Motivation zur Durchführung des Vorhabens	5
2.2 Expertise der Projektpartner	5
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
3.1 Projektplanung	7
3.2 Notwendige Umplanungen während der Projektlaufzeit	9
3.3 Tatsächlicher Projektablauf	10
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	15
4.1 Theoretische Grundlagen der außenliegenden Wandtemperierung	15
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	24
II Eingehende Darstellung	25
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte wissenschaftlich- technische Ergebnisse	25
1.1 Erarbeitung der theoretischen Grundlagen der aLT	25
1.2 Umsetzung Demonstrationsgebäude bzw. der Feldtestfassade	32
1.3 Detaillierte Beschreibung der Feldtestflächen der aLT	45
1.4 Versuche mit der aWT-Feldtestfläche	45
1.5 Erstellung einer aWT-Musterwand	59
1.6 Versuche an der aLT-Feldtestfläche	68
1.7 Modellierung und Validierung der aWT und aLT	68
1.8 Gebäudesimulation	68
1.9 Umsetzung Wärmeversorgungs-System	99
1.10 Zusammenfassung der Ergebnisse und Optimierungspotentiale	108
1.11 Veranstaltungen	110
2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	111
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	111
4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Verwertungsplan)	111
5 Fortschritte anderer Stellen während der Projektlaufzeit	113
6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	114
6.1 Artikel und Vorträge:	114
6.2 Pressemeldungen und Posterpräsentationen:	115
6.3 Durchgeführte studentische Arbeiten / Abschlussarbeiten:	116
7 Quellen	117
8 Anhang	119

I Kurze Darstellung

In diesem Kapitel werden kurz die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens, die Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, die Planung und der Ablauf des Vorhabens, der technisch bzw. wissenschaftliche Stand an den angeknüpft wurde sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen innerhalb des Vorhabens erläutert.

1 Aufgabenstellung

In dem Forschungsvorhaben wurde die praktische Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt (Außen liegende Wandheizung, Förder-Kennzeichen: 0327370T) in unterschiedlichen Feldtestanwendungen untersucht. Des Weiteren sollten in dem Forschungsvorhaben potenzielle exergetische Vorteile der außenliegenden Wandtemperierung (aWT) durch die Verbindung mit innovativen Systemkonzepten untersucht werden. Aufbauend auf dem Vorprojekt soll der realisierbare Systemnachweis der aWT mit verschiedenen System- und Anlagenkomponenten im Feldtest erfolgen. Im Vorprojekt stellte sich heraus, dass ein Einsatz der aWT für verschiedene Anwendungsfälle mit primärenergetischen Vorteilen verbunden sein kann. Diese Anwendungsfälle sollten in dem Vorhaben in verschiedenen ‚Teilprojekten‘ realisiert und analysiert werden. Durch das starke Interesse der Baupraxis an dem Systemkonzept der Außenwandtemperierung, das auf Baufachmessen, bei einschlägigen Verbänden und von Projektumsetzern zu der Projektleitung des Vorgängerprojekts getragen wurde, erschien die parallele Bearbeitung dieser Anwendungsfälle sinnvoll. Es wurde angestrebt, die Auslegung und Vorbereitung der Feldtests möglichst frühzeitig - parallel zu theoretischen Analysen - in Angriff zu nehmen, weil erfahrungsgemäß Planungs- und Genehmigungsabläufe einen großen Zeitbedarf haben. Für die Durchführung der Feldtests war vorgesehen, mindestens je eine Winter- und, wo das Gesamtsystem es sinnvoll erscheinen lässt, eine Sommerperiode (für Kühloptionen) einzuschließen.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Projekts bestehen allgemein aus folgenden Punkten:

- Analyse und Bewertung der auszuführenden LowEx-Systeme in Feldtest-Anlagen: Durch die theoretische Anlagendimensionierung soll das jeweilige Systemverhalten vorausberechnet werden. Daraus werden Erkenntnisse bzgl. der optimierten Systemkonfiguration sowie der Steuerungs- und Regelungsoptimierung und der energetischen Bilanzierung abgeleitet.
- Definition neuer Systeme für Heizwärme- und Kälteanwendungen mit Zwischenspeicherung von Niedertemperaturwärme: In der Systemanalyse findet neben der Speichereinbindung vor allem die Notwendigkeit, dynamische Heiz- oder Kühlanforderungen zu erfüllen, besondere Beachtung.
- Entwicklung von Systemkonzepten die eine weitere exergetische Verbesserung der Außenwandtemperierung versprechen:
 - Indirekte Kombination eines aWT-Systems mit einem im Außenputz integrierten Flächenabsorber via Wärmepumpeneinsatz. Entwicklung und Systemintegration geeigneter kostengünstiger Eisspeicher als Wärmesenke des im Außenputz integrierten Flächenabsorbers und zur Überbrückung/Nivellierung von Kälte- oder Hitzeperioden
 - Entwicklung einer überkritischen CO₂-Wärmepumpe und Einbindung in eine – zu niedrigeren Temperaturen hin – erweiterte Energiekaskade. Diese Energiekaskade reicht vom warmen Brauchwasser bis zur Zuluft- Vortemperierung. Durch die mögliche Energienutzung bis in den tiefen Temperaturbereich der außenliegenden Lufttemperierung (aLT) ergibt sich ein „Windfall Profit“ bzgl. der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
 - Entwicklung eines Konzepts zur aLT, eines Zuluft-Vorwärmers für Wohnungslüftungssysteme, der die aWT zur gleichzeitigen Zulufttemperierung nutzt
- Umsetzung der entwickelten Systemkomponenten in Feldtestanwendungen:
 - Umsetzung der Systemkombination Außenwandabsorber – Eisspeicher– aWT in einem Ein- oder Mehrfamilienhaus.

- Umsetzung des aWT-Konzepts bei einem großem Mehrfamilienhaus – möglichst in Kombination mit einer CO₂ Wärmepumpe
- Umsetzung der aLH-aWH Systemkombination als Ersatz einer Elektro-Nachtspeicherheizung in einem Bestandsgebäude. Gerade Bestandsgebäude mit Elektro-Nachtspeicherheizungen sind gute Anwendungsfälle, da sich hier ein Kostenvorteil für die aWH ergibt (neues Innenheizsystem erforderlich, dies verursacht nicht nur Kosten, sondern die Einbringung stört in der Sanierungsphase auch die Bewohner erheblich). Das ausreichend schnelle dynamische Verhalten der aWH kann durch wenige „von außen gespeiste“ neue Innenheizkörper erreicht werden. Dabei kann die Heizungswasserzuführung in der aWT-Ebene liegen und quasi durch die Außenwand gespeist werden. Zusätzlich kann die Nutzung der aLH die Systemeigenschaften verbessern.

Bei der Umsetzung im Feldtest wurden wichtige Erfahrungen gewonnen bzgl. der Optimierung von Schnittstellen am Bau und der Baukosten allgemein. Gleichzeitig sollte der Bauablauf analysiert und für zukünftige Vorhaben optimiert werden. Letztlich sollte im Laufe der Realisation die Validierung der theoretischen Vorhersagen aus dem vorangegangenen Projekt ermöglicht werden.

Auf Grundlage der im Projekt erlangten Erkenntnisse sollte ein „Leitfaden für die Praxis“ für Planer und andere beteiligte Akteure am Bauablauf entwickelt werden. Der Leitfaden soll es ermöglichen, die Eignung eines beliebigen Altbau-Objektes für eine derartige Sanierung abzuschätzen. Mit dieser Maßnahme soll schließlich die Markttauglichkeit der Systeme erreicht werden.

Zudem gehörte eine wichtige praktische Frage zu den Analysezielen des Projekts:

„Wie stark verringert eine aWT-Sanierung die Belästigung der Bewohner tatsächlich?“ Kommt es hier im Laufe des Projekts zu einem positiven Ergebnis so kann dies alleine schon ein ausschlaggebender Grund für eine starke Verbreitung dieser Sanierungstechnologie werden.

Zusammenfassend war das Gesamtziel von LEXU II die Planung, der Aufbau und die Demonstration der Machbarkeit der außenliegenden Wand- und Lufttemperierung und die Ermittlung relevanter Kennwerte mittels Messungen, Berechnungen, Modellbildung und Simulation.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In diesem Kapitel wird kurz auf die Motivation zur Durchführung des Vorhabens sowie auf die Expertise der Vorhabenbeteiligten eingegangen.

2.1 Motivation zur Durchführung des Vorhabens

Der Projektantrag war im Förderschwerpunkt der Bundesregierung energieoptimiertes Bauen/Sanieren (EnOB und darin LowEx sowie EnSan) angesiedelt. Die außen liegende Wandtemperierung (aWT) bietet neue Lösungsansätze für niederexergetische Heiz- und Kühlsysteme.

Die aWT stellt ein Niedrig-Exergie-System dar, das zum Heizen und Kühlen mit innovativen Konzepten für Wärmeerzeugung und -verteilung kombiniert werden kann. Die Installation einer aWT ist immer im Zusammenhang mit einer energetischen Optimierung des „Gesamtsystems Gebäude“ zu sehen. Daher eignet sich die aWT besonders für die noch in großem Umfang erforderliche Altbausanierung und die damit einhergehende „Wärmewende“.

Anhand des Vorhabens wurden die beiden Systeme (aWT und aLT) entwickelt, in Feldtestobjekten umgesetzt und die künftige Marktfähigkeit untersucht. Auch eine Entwicklung und Erprobung aussichtsreicher Techniken zur kurz- und langfristigen Wärme- und Kältespeicherung in Form von Phasenwechsel-Untergrundspeichern wurde in einem Teilprojekt behandelt. Für den umgesetzten Demonstrator konnte zudem Niedertemperatur-Solarwärme sinnvoll integriert werden.

Des Weiteren soll über einen „Leitfaden für die Praxis“ ein leichter Transfer der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in die Aus- und Weiterbildung von Fachplanern, Architekten und Handwerkern erreicht werden. Dies konnte durch die umgesetzte Musterwand und deren Nutzung für die Ausbildung sowie als Demonstrationsobjekt bei Messeauftritten (siehe Kapitel II1.5) erreicht werden.

2.2 Expertise der Projektpartner

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte durch eine enge Zusammenarbeit von mehreren wissenschaftlichen und industriellen Partnern. Deren Rolle und Expertise wird im Folgenden kurz zusammengefasst:

P1, IZES gGmbH (IZES): Die IZES gGmbH betreibt angewandte Forschung und Entwicklung in den Feldern Regenerative Energien, Rationelle Energienutzung, Energiesystemtechnik und Zukunftsmärkte, dabei werden energietechnische und energiewirtschaftliche Fragestellungen integriert betrachtet. Zu den zentralen Aufgaben des IZES zählt die Entwicklung und Analyse zukunftsfähiger Energiesysteme (v.a. Gebäude, Siedlungen, industrielle Produktionsprozesse) unter Berücksichtigung des Zusammenspiels von Energietechniken, Energiemärkten und Akteuren sowie in der Konzipierung marktorientierter Dienstleistungen.

IZES ist Antragsteller und übernimmt die Gesamtkoordination der Teilprojekte sowie die Koordination in den einzelnen Teilprojekten. Darüber hinaus wird das Institut die Gebäude- und Anlagensimulation, die Konzeptionierung und den Aufbau der Feldtestflächen sowie die Erfassung und Verarbeitung der Messdaten der einzelnen Feldtests übernehmen. Die Ergebnisse aus den theoretischen Berechnungen, Simulationen und den Feldtests werden verantwortlich durch die IZES gGmbH veröffentlicht.

P2, WIDAG GbR: Herr Prof. Dr. Horst Altgeld ist zusammen mit Herr Dr. Gerhard Luther einer der Ideengeber der aWT und aLT. Im Projekt LEXU II fungiert er als externer Projektleiter und Berater bei projektspezifischen Fragestellungen im Kontext von Energiesystemen. Zusätzlich war Herr Altgeld an der Projektkoordination, der Bauüberwachung und der Öffentlichkeitsarbeit beteiligt.

P3, Dr. Gerhard Luther: Herr Dr. Gerhard Luther ist im Rahmen des Projekts unterstützend bei den wissenschaftlichen Fragestellungen hinsichtlich der aWT und aLT tätig. Er war und ist maßgebend an der Weiterentwicklung der Idee der aWT und aLT beteiligt und hat hier vor allem die theoretischen Grundlagen der Komponenten erarbeitet und dokumentiert, siehe entsprechende Veröffentlichungen in Kapitel II6.

P4, Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade, Baden-Württemberg: Der Fachverband der Stuckateure stellt auf Grundlage seines Know-hows aus der Praxis einen wichtigen Partner bzgl. der wissenschaftlich-technischen Umsetzung der aWT und aLT dar. Gleichzeitig ist der Fachverband der Stuckateure ein wichtiger Partner bzgl. des Praxistransfers der erzielten Ergebnisse und deren Umsetzung (Baupraxis).

P5, Isocal Heiz/Kühlsysteme GmbH: Die Isocal Heiz/Kühlsysteme GmbH war der Entwickler und Hersteller der Eisspeicher-Idee in Deutschland. Im Rahmen des Projekts sollte durch Isocal der Eisspeicher (+Peripherie) ausgelegt und geliefert werden. Leider wurde das Unternehmen kurz nach Projektstart (10/2012) von der Viessmann Group übernommen. Isocal wurde 2005 in Friedrichshafen gegründet und war, nach eigenen Angaben, Marktführer für umweltschonende und effiziente Lösungen von Heiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Speichermedium. Die Firma Isocal wurde innerhalb des Projekts durch einen Kontakt zum Nachfolge-Unternehmen Viessmann Eis-Energiespeicher GmbH ersetzt.

P6, Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH: Clina ist der führende Hersteller von Kunststoff-Kapillarrohrmatten und wurde 1994 gegründet. Im Rahmen des Projekts werden von Clina die benötigten Kapillarrohrmatten für die aWT und aLT ausgelegt, gefertigt und geliefert.

P7, Thermea Energiesysteme GmbH: Thermea war ein Hersteller von Hochtemperatur-Wärmepumpen auf Basis des natürlichen Kältemittels CO₂. Die Wärmepumpen wurden in der Nähe von Dresden gefertigt. Für das Projekt LEXU II wurde zusammen mit Thermea ein Prototyp einer „kleinen“ Wärmepumpe, passend für ein Einfamilienhaus konzipiert und gefertigt. Thermea hatte vorher nur Wärmepumpen im Leistungsbereich zwischen 50 und 1000 kW im Portfolio. Im Jahr 2015 wurde Thermea von der Dürr AG übernommen und in der Zwischenzeit wurde der Geschäftsbetrieb eingestellt.

P8, GEFGA Energiesysteme GmbH: Planungsbüro mit Spezialisierung auf Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden, mit dem Fokus auf Flächensystemen. Im Projekt wurde von GEFGA die Belegungsplanung der umgesetzten Feldtestfassade erbracht.

P9, HGE Ingenieure GmbH: Planungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Innerhalb des Projekts LEXU II wurde von HGE die Hydraulik in der Technikzentrale und die Verbindung mit den einzelnen Komponenten geplant.

P10, AES Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme der Universität des Saarlandes: Lehrstuhl der Universität des Saarlandes mit großer Erfahrung im Bereich der Regelungs- und Automatisierungstechnik.

Zusätzlich waren an dem Projekt eine Wohnungsbaugesellschaft (WOGES Saar) und ein Stadtwerk (Stadtwerke St. Ingbert) beteiligt. Auch Hersteller von Baumaterialien, insbesondere Wärmedämmung, waren am Projektfortschritt und den Umsetzungen beteiligt (Sto AG, Bauplast GmbH, Knauf).

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In diesem Kapitel werden zunächst die ursprüngliche Projektplanung und anschließend der tatsächliche Projektverlauf gezeigt. Die ausführliche Beschreibung des Projektverlaufs inklusive detaillierter Begründungen für Abweichungen von der ursprünglichen Planung sind in Kapitel I3.2 dargestellt.

3.1 Projektplanung

Das Vorhaben war entsprechend der Vorhabenbeschreibung (08/2010) in fünf inhaltliche Arbeitspakete sowie ein administratives Arbeitspaket (AP6) unterteilt. Jedes Arbeitspaket war auf die Mitarbeit der vorgesehenen Projektbeteiligten angewiesen. Die Inhalte und die Abfolge der einzelnen Arbeitspakete sind miteinander verknüpft. Die Verknüpfung der Arbeitsschritte sowie die Aufteilung auf die Arbeitspakete in Meilensteine ist in Abbildung 1 dargestellt. Die kostenneutralen Laufzeitverlängerungen und folgenden Umplanungen des Vorhabens sind an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt. Die Darstellungen beruhen auf der Projektplanung zu Projektbeginn bzw. in der Antragsphase.

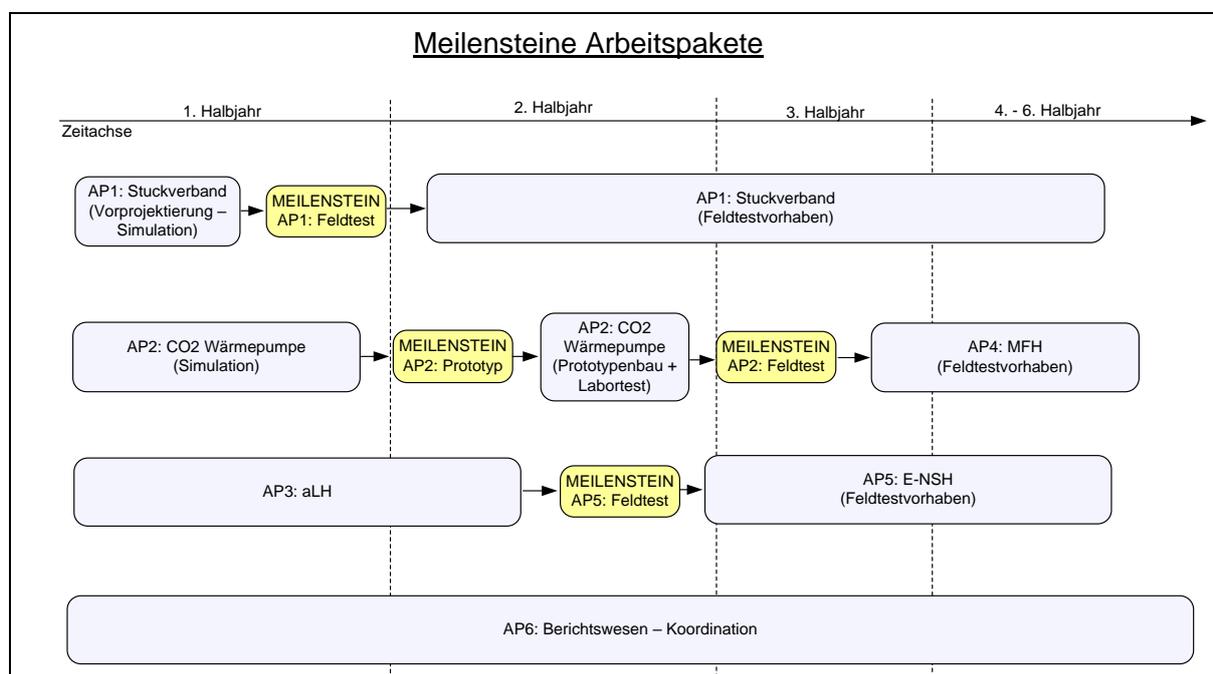


Abbildung 1: Zusammenhänge und Verantwortlichkeiten zwischen den einzelnen Arbeitsschritten und Aufteilung auf die Arbeitspakete

Insgesamt waren somit drei Feldtestvorhaben geplant:

- 🌱 **Feldtest 1:** Standard-Umsetzung der aWT in Kombination mit Putzabsorber, Eisspeicher und Wärmepumpe (in Kooperation mit dem Fachverband der Stuckateure aus Baden-Württemberg).
- 🌱 **Feldtest 2:** Kombination der aWT mit einer CO₂-Wärmepumpe (AP2) für ein MFH, in Kooperation mit einer regionalen Wohnungsbaugesellschaft (WOGÉ Saar).
- 🌱 **Feldtest 3:** Einsatz der aWT an einem Gebäude mit Elektro-Nachtspeicherheizung, optional ergänzt um den Einsatz der aLT, je nach Ergebnis des Labortests der aLT in AP3. Dieser Feldtest war in Kooperation mit einem lokalen Stadtwerk geplant, in dessen Gebiet noch viele Elektro-Nachtspeicherheizungen verbaut waren.

Arbeitspakete – Forschungsprojekt LEXU II „PLANUNG“	
AP 1	Kombination der außenliegenden Wandtemperierung mit Putzabsorber, Eisspeicher und Wärmepumpe – Feldtest 1
AP1.1	Machbarkeitsanalyse und Potenzialermittlung der Systemkombination
AP1.2	Simulation möglicher Systemkonzepte
AP1.3	Entwicklung geeigneter Regelungsstrategien
AP1.4	Untersuchung der Praxistauglichkeit des Gesamtsystems
AP1.5	Durchführung eines Anlagen-Monitorings (Heiz- und Kühlperiode)
AP1.6	Entwicklung eines softwareunterstützten Praxisleitfadens für Systemplaner
AP 2	Kombination von aWT-Systemen mit transkritischer CO₂-Wärmepumpe
AP2.1	Machbarkeits- und Potentialstudie
AP2.2	Dynamische Simulation anhand eines realen Gebäudes
AP2.3	Entwicklung und Bau eines Prototyps (Thermea Energiesysteme)
AP2.4	Laborprüfung und messtechnische Auswertung des Prototyps im Technikum
AP 3	Außenliegende Lufttemperierung (aLT)
AP3.1	Energetische Untersuchung der Idee der aLT (Modellbildung)
AP3.2	Konzeption der aLT: Gewerke, Schnittstellen, Schichtaufbau
AP3.3	Aufbau einer Testwand der aLT im Technikum
AP3.4	Laborprüfung und messtechnische Auswertung der aLT
AP 4	Feldtest MFH mit CO₂-Wärmepumpe und außenliegender Wandtemperierung (aWT) – Feldtest 2
AP4.1	Konzeptentwicklung (Belegung und Anbringung aWT)
AP4.2	Hydraulikkonzept (Kombination von aWT und CO ₂ -WP)
AP4.3	Umsetzung und Untersuchung der Praxistauglichkeit des Systems
AP4.4	Monitoring und Auswertung
AP 5	Ersatz Elektro-Nachtspeicherheizung – Feldtest 3
AP5.1	Konzeptentwicklung (Belegung und Anbringung aWT + aLT (optional))
AP5.2	Hydraulikkonzept (aWT + aLT + ggfs. inneres Heizsystem)
AP5.3	Umsetzung und Untersuchung der Praxistauglichkeit
AP5.4	Optimierung der Regelungsstrategie für das ausgewählte Gebäude
AP5.5	Monitoring und Auswertung
AP 6	Projektkoordination
AP6.1	Berichte und Dokumentation
AP6.2	Administration und Organisation
AP6.3	Wissenschaftliche und öffentliche Verbreitung der Projektergebnisse

Abbildung 2: Arbeits- und Unterarbeitspakete des Forschungsprojektes LEXU II, entsprechend der Vorhabenbeschreibung aus dem Jahr 2010.

3.2 Notwendige Umplanungen während der Projektlaufzeit

Durch notwendige Umplanungen wurden aus den ursprünglich fünf geplanten Arbeitspaketen drei Arbeitspakete. Von den drei angestrebten Feldtestumsetzungen konnte nur eine realisiert werden. Im Zuge der Umplanungen wurde jedoch versucht die Projektinhalte, die vorher über drei Feldtestumsetzungen aufgeteilt waren, auf eine Feldtestumsetzung weitestgehend zu übertragen. Die Gründe für die Umplanungen können den Zwischenberichten des Projekts entnommen werden. Zusammengefasst bezogen sich die Umplanungen auf Probleme bei den einzelnen Feldtestgebäuden (Änderung der Umsetzungszeiträume und unklare Zeitplanung der Umsetzung bei den Eigentümern). Im Endeffekt wurden die beiden Arbeitspakete AP4 und AP5 zugunsten eines „erweiterten“ AP1 „NEU“ aufgegeben und somit drei, zu diesem Zeitpunkt zeitlich unklare Feldtestgebäude gegen ein „sicheres“ Feldtestgebäude auf dem Campus der Universität des Saarlandes „getauscht“. In Abbildung 3 sind die entsprechenden Arbeiten nach der Umplanung dargestellt. Um eine fortlaufende Nomenklatur einzuhalten wurde die Projektkoordination in der Folge als AP0 (anstatt AP6) bezeichnet.

Arbeitspakete – Forschungsprojekt LEXU II „UMPLANUNG“	
AP1	Kombination der außenliegenden Wandtemperierung mit PVT-Hybridkollektoren, Eisspeicher und Wärmepumpe – Feldtest 1
AP1a	Feldtest außenliegende Wand- und Lufttemperierung
1a.1	Voruntersuchung / Auslegung und Aufbau
1a.2	Untersuchung der Komponenten (aWT & aLT) im Feldtest
1a.3	Simulations- und Potentialstudien
1a.4	Analyse und Ergebnisverwertung
AP1b	Untersuchung des Gesamtsystems
1b.1	Voruntersuchung / Sensitivitätsanalyse mittels Systemsimulation
1b.2	Untersuchung / Optimierung des Gesamtsystems
1b.3	Untersuchung / Optimierung der Regelstrategie
1b.4	Analyse und Ergebnisverwertung
AP2	Kombination von aWT-Systemen mit transkritischer CO₂-Wärmepumpe
AP2.1	Machbarkeits- und Potentialstudie
AP2.2	Dynamische Simulation anhand eines realen Gebäudes
AP2.3	Entwicklung und Bau eines Prototyps (Thermea Energiesysteme)
AP2.4	Laborprüfung und messtechnische Auswertung des Prototyps im Technikum
AP3	Außenliegende Lufttemperierung (aLT)
AP3.1	Energetische Untersuchung der Idee der aLT (Modellbildung)
AP3.2	Konzeption der aLT: Gewerke, Schnittstellen, Schichtaufbau
AP3.3	Aufbau einer Testwand der aLT im Technikum
AP3.4	Laborprüfung und messtechnische Auswertung der aLT
AP0	Projektkoordination
AP0.1	Berichte und Dokumentation
AP0.2	Administration und Organisation
AP0.3	Wissenschaftliche und öffentliche Verbreitung der Projektergebnisse

Abbildung 3: Arbeits- und Unterarbeitspakete des Forschungsprojektes LEXU II, entsprechend der letzten Umsetzung.

3.3 Tatsächlicher Projektablauf

3.3.1 AP1 „Feldtestobjekt UdS“

Entsprechend der Umplanungen aus Kapitel 3.2 sollte das „neue“ Arbeitspaket AP1 zum 01.07.2015 starten. Eine erste Begehung des Gebäudes fand im November 2014 statt. Die Vorstellung des Feldtestobjektes und der Arbeitsschritte gegenüber dem Projektträger erfolgte im März 2015, eine weitere Besprechung des Objektes mit allen Projektbeteiligten fand im Mai 2015 statt. Schließlich konnte eine aktualisierte Vorhabenbeschreibung im Juni 2015 eingereicht werden. Insofern erübrigt sich ein Vergleich mit den Planungen zu Projektstart. In der folgenden Tabelle sind die wichtigen Daten der Umsetzung des Feldtestobjekts an der Universität des Saarlandes aufgeführt:

Tabelle 1: Wichtige Daten und Arbeitsschritte des Projektablaufs von AP1

Komponente	Beschreibung	Datum	Ausgeführt
Gebäude	Begehung Gebäude C3.1, UdS	11/2014	
Meeting	Vorstellung Gebäude und Umsetzungsidee PTJ	03/2015	
Meeting	Projektbesprechung mit Vorstellung Geb. C3.1	05/2015	
Antrag	Einreichung geänderte Vorhabenbeschreibung PTJ	06/2015	
Eisspeicher	Definition Lage Eisspeicher und Erdleitungen	06/2015	
Eisspeicher	Anlieferung und Einbau Eisspeicher	07/2015	
Fassade	Start Betonsanierung / Aufbau Gerüst	08/2015	
Fassade	Finalisierung Belegungsplanung aWT & aLT	08/2015	
Fassade	Fertigstellung Konzept aLT (Schichtaufbau & Materialien)	08/2015	
Fassade	Montage Kapillarrohrmatten / Ein- und Überputzen	09/2015	
Fassade	Statikkonzept der aLT / Start der Innenarbeiten	09/2015	
Fassade	Installation Messtechnik Fassade (aWT & aLT)	10/2015	
Fassade	Aufbringen der Wärmedämmung & Armierungsgewebe	11/2015	
Fassade	Reparatur Kapillar wg. Beschädigung durch Gerüstanker	12/2015	
Fassade	Fertigstellung Fassade / Abbau Gerüst	01/2016	
Meeting	Besprechung mit PTJ wegen Mehraufwand der Umsetzung	02/2016	
Antrag	Einreichung Aufstockungsantrag wegen Mehraufwand	04/2016	
Baustopp wegen Aufstockungsantrag 01/2016 bis 08/2016			
Zentrale	Ausräumen Container und Fundament Wärmepumpe	08/2016	
Zentrale	Aufbau Hydraulikverteilung in Technikzentrale	08/2016	
Zentrale	Anlieferung Wärmepumpe und Pufferspeicher	09/2016	
Zentrale	Installation der Erdleitungen zu den Komponenten	12/2016	
Eisspeicher	Hydraulischer Anschluss Eisspeicher an Erdleitungen	12/2016	
PVT-Dach	Installation der PVT-Hybridkollektoren	12/2016	
PVT-Dach	Installation der Steigleitungen auf das Dach	01/2017	
PVT-Dach	Spülen, Befüllen und Hydraulische Inbetriebnahme Module	02/2017	
Zentrale	Installation Messtechnik und Datenerfassung Zentrale	08/2017	
Eisspeicher	Installation Messtechnik Eisspeicher	09/2017	
Zentrale	Installation Wechselrichter → elektr. Inbetriebnahme PVT	09/2017	
Eisspeicher	Befüllung/Inbetriebnahme Eisspeicher	11/2017	
PVT-Dach	Installation Sensorik Wetterstation und Module	11/2017	
Zentrale	Inbetriebnahme Wärmepumpe durch Hersteller	12/2017	
Eisspeicher	Feststellung Bewuchs Eisspeicher (Algen?)	05/2018	
PVT-Dach	Installation Entlüftungsventile: Spülen und Abdrücken	05/2018	
Eisspeicher	Reinigung Eisspeicher & Installation Füllstandssensorik	06/2018	
Eisspeicher	Wiederbefüllung Eisspeicher	07/2018	
Zentrale	Fertigstellung Technikzentrale	08/2018	
Inbetriebnahme der Anlage zur Heizperiode 2018/19			
Gebäude	Aufstellen Baustellenschild „LEXU II“	10/2018	

Die komplette Anlage konnte zum Jahresende 2018 in Betrieb genommen werden.

In Tabelle 2 ist der tatsächliche Projektablauf von AP1a „Feldtest aWT & aLT“, in Anlehnung an die entsprechenden Tabellen aus der Vorhabenbeschreibung vom 02.06.2015 dargestellt. Zwar hat sich der Projektverlauf deutlich verzögert und es wurde eine Aufstockung benötigt, siehe Beschreibung in Kapitel 3.1, jedoch konnte der Arbeitsplan von AP1a vollumfänglich abgearbeitet werden. Lediglich die zweite Messperiode konnte aus Zeitgründen nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden, eine weitere Projektverlängerung war durch die lange Gesamtlaufzeit jedoch ausgeschlossen.

Tabelle 2: Tatsächlicher Projektablauf von AP1a „Feldtest aWT & aLT“

AP1a „Feldtest aWT & aLT“	1. HJ 15	2. HJ 15	1. HJ 16	2. HJ 16	1. HJ 17	2.HJ 17	1.HJ 18	2.HJ 18	1.HJ 19	2.HJ 19
1a.1 Voruntersuch.: Auslegung & Aufbau										
- Anbringung aWT										
- Aufbau, Luftführung & Anbringung aLT										
- Modellierung aWT & aLT (TRNSYS)										
1a.2 Feldtest aWT/aLT, Monitoring										
- Unterstützende Planung und Installation										
- Bauleitung und Bauüberwachung										
- Messtechnik und Datenerfassung										
- 1. Messperiode Monitoring aWT/aLT										
- Validierung der Simulationsmodelle										
- 2. Messperiode Monitoring aWT/aLT										
1a.3 Simulations- und Potentialstudien										
- Implementierung in Standardsysteme										
- Simulations- und Potentialstudien										
1a.4 Ergebnisanalyse und -verwertung										
- Übertragung der Ergebnisse										
- abschließende Auswertung										

3.3.1.1 Zusätzlich notwendige Arbeiten in AP1a:

Administrativ: In AP1a waren vor allem zusätzliche Arbeiten bzgl. der Bauleitung bei der Umsetzung der aWT und der aLT notwendig, siehe auch die Ausführungen in den entsprechenden Zwischenberichten. Durch die Projektverlängerung und die Verzögerungen im Projektverlauf erhöhte sich auch der Aufwand für Bauleitung und -koordination sehr deutlich.

Inhaltlich: Auf inhaltlicher Ebene waren zusätzliche Arbeiten bei der Konzeption des Schichtaufbaus der Feldtestfassade notwendig. Hier galt es die thermisch-energetischen Ansprüche mit den Richtlinien des Herstellers der Materialien und dem ausführenden Betrieb zu harmonisieren. Im Endeffekt war es wichtig, dass eine Gewährleistung für die ausgeführte Fassade übernommen wurde (ausführende Betriebe und Hersteller der Baumaterialien) und andererseits der Schichtaufbau den theoretischen Grundlagen und Grundgedanken der aWT entspricht. Dies konnte erreicht werden, jedoch entspricht der Schichtaufbau der Fassade nicht dem Standardfall der aWT. Dies ist vor allem durch die verbaute Sensorik bedingt. Daher wurde entschieden, zusammen mit dem Projektpartner „Fachverband der Stuckateure“ eine Modellwand des Standardfalls der aWT zu errichten, um anhand dieser Modellwand:

- a) Den Schichtaufbau eines Standardfalls zu zeigen.
- b) Die Systemkosten für diesen Standardfall zu ermitteln.

Für diesen Arbeitsschritt wurde der eigentlich geplante Praxisleitfaden¹ aufgegeben.

¹ Entwicklung eines softwareunterstützten Praxisleitfadens für Systemplaner.

In Tabelle 3 ist der tatsächliche Projektablauf von AP1b „Feldtest aWT & aLT“, in Anlehnung an die entsprechenden Tabellen aus der Vorhabenbeschreibung vom 02.06.2015 dargestellt. Entsprechend AP1a hat sich auch hier der Projektverlauf deutlich verzögert. Einige Teile der geplanten Arbeiten konnten nicht innerhalb des Projekts umgesetzt werden. Die vorhandenen Projektmittel und -ressourcen wurden primär für die Umsetzung der aWT & aLT und die notwendigen Teile des Systems für den Betrieb der Feldtestfassade eingesetzt. Einige zusätzliche Fragestellungen zum System (WP + Eisspeicher + PVT-Kollektoren) wurden daher zugunsten des Mehraufwands bei der Umsetzung und den praktischen Untersuchungen der aWT/aLT aufgegeben.

Tabelle 3: Tatsächlicher Projektablauf von AP1b „Untersuchung Gesamtsystem“

AP1b „Untersuchung Gesamtsystem“	1. HJ 2015	2. HJ 2015	1. HJ 2016	2. HJ 2016	1. HJ 2017	2.HJ 17	1.HJ 18	2.HJ 18	1.HJ 19	2.HJ 19
1b.1 Voruntersuchung mittels Simulation										
- Modellierung des Systems (TRNSYS)										
- Durchführung von Variantensimulation										
- Analyse der Ergebnisse										
1b.2 Feldtest System										
- Unterstützende Planung und Installation										
- Bauleitung und Bauüberwachung										
- Messtechnik und Datenerfassung										
- 1. Messperiode Monitoring System										
- Validierung der Simulationsmodelle										
- Systemoptimierung										
- 2. Messperiode Monitoring System										
1b.3 Untersuchung der Regelung des Systems, Monitoring und Optimierung										
- Entw. & Sim. der Standardregelung										
- Implementierung der Standardregelung										
- 1. Messperiode Monitoring Regelung										
- Optimierung der Regelstrategien										
- Implementierung der opt. Regelung										
- 2. Messperiode Monitoring Regelung										
1b.4 Ergebnisanalyse und -verwertung										
- Übertragung der Ergebnisse										
- abschließende Auswertung										

3.3.1.1 Zusätzlich notwendige Arbeiten in AP1b:

Bei AP1b waren zusätzliche Arbeiten bei der Planung der Installation von Eisspeicher und Verlegung der Erdleitungen notwendig. Da für das Baufeld keine verlässliche Karte bzgl. Leitungen und Kabel existierte, mussten mehrere Suchgräben angelegt werden um die Leitungswege identifizieren zu können und somit den Platz für Eisspeicher und die Lage der Erdleitungen definieren zu können. Bzgl. der Installation der PVT-Kollektoren waren zusätzliche Arbeiten bzgl. der Abklärung der Statik des Dachs im Kontext der Beschwerung der Module notwendig. Da der Dachaufbau nicht dokumentiert war (Schichtaufbau), musste eine Probe entnommen werden und ein Druckversuch durchgeführt werden. Da sich das Ergebnis des Druckversuchs positiv darstellte, konnte das Dach mit den PVT-Kollektoren belegt und entsprechend beschwert werden. Weitere Untersuchungen waren hinsichtlich der Verschattung des Dachs (u.a. durch einen nebenstehenden UMTS-Mast) notwendig. Zusätzlich konnte auf diesem Weg auch die Eigenverschattung der Modulreihen minimiert bzw. verhindert werden. Bei Verlegung der Steigleitung auf das Gebäude kam es zu einem Mehraufwand bzgl. der Anbringung und der optischen Ausgestaltung der Steigleitungen.

3.3.2 AP2 „CO₂-Wärmepumpe“

Im Arbeitspaket AP2 kam es durch Lieferprobleme bei den Komponenten für den Prototypen der CO₂-WP insgesamt zu einer Verzögerung der Anlieferung der WP um 4-5 Monate. Diese verzögerte Anlieferung beeinflusste die Durchführung der Laborversuche und die davon abhängigen Aufgaben. Das Arbeitspaket wurde im September 2013 mit der Schlussbesprechung in Saarbrücken inhaltlich abgeschlossen und der Abschlussbericht zu den Laborprüfungen am 31.01.2014 beim Projektträger eingereicht. Der Abschlussbericht zum thermodynamischen Potential der CO₂-WP von Herrn Dr. Luther wurde am 10.05.2015 eingereicht. Insgesamt konnte das Arbeitspaket somit erfolgreich, mit einer kleinen zeitlichen Verzögerung, abgeschlossen werden. Es konnten alle geplanten Arbeiten umgesetzt werden.

Tabelle 4: Tatsächlicher Projektablauf von AP2

Aufgabe	Inhalt	Fälligkeit	Verantwortung	Ausgeführt
Kickoff	Auftakttreffen	Monat 1	IZES	26.01.2012
Analyse	Machbarkeitsanalyse	Monat 3	Thermea	Monat 3
Simulation	Simulation aWT/aLT mit CO ₂ -WP	Monat 7	IZES	Monat 7
Meeting	Besprechung (Dresden, Thermea)	Monat 7	Thermea	30.07.2012
Entwicklung	Entwicklung und Bau Prototyp	Monat 10	Thermea	Monat 15 ²
Messtechnik	Planung Messtechnik Prüfstand	Monat 9	IZES	Monat 9
Prüfstand	Konzeption und Aufbau Prüfstand	Monat 11	IZES	Monat 14
Messtechnik	Montage Messtechnik Prüfstand	Monat 11	IZES	Monat 14
Messungen	Durchführung der Messungen	Monat 15	IZES	Monat 19
Analyse	Datenanalyse	Monat 16	IZES	Monat 20
Meeting	Schlussbesprechung (Saarbrücken)	Monat 17	IZES	25.09.2013
Bericht	Abschlussbericht "Laborprüfung"	Monat 23	IZES	31.01.2014
Bericht	Abschlussbericht "Th. Potential"	Monat 23	G. Luther	10.05.2015

3.3.2.1 Zusätzlich notwendige Arbeiten in AP2:

In AP2 waren zusätzliche Arbeiten notwendig, da das vorab zur Verfügung gestellte Kennfeld der Wärmepumpe und das am Prüfstand ermittelte Kennfeld deutlich voneinander abwichen. Die Abweichungen konnten ermittelt und erklärt werden (Wärmedämmung, Kennlinie Frequenzumwandler und Strombedarf der Regelung), siehe dazu gesonderter Abschlussbericht.

3.3.3 AP3 „Außenliegende Lufttemperierung“

Durch die Verzögerungen in AP2 und die daraus resultierenden freien Kapazitäten konnten die Arbeiten an AP3 beschleunigt und das Arbeitspaket inhaltlich vor der geplanten Fälligkeit abgeschlossen werden. Der Abschlussbericht zu den Messungen an der Laborwand wurde am 13.02.2013 an den Projektträger übermittelt und der Abschlussbericht zu der Theorie der aLT von Herrn Dr. Luther am 16.01.2013. Alle geplanten Arbeiten konnten fristgerecht und entsprechend dem geplanten Umfang ausgeführt werden.

Tabelle 5: Tatsächlicher Projektablauf von AP3

Aufgabe	Inhalt	Fälligkeit	Verantwortung	Ausgeführt
Kickoff	Auftakttreffen	Monat 1	IZES	26.01.2012
Konzept	Konzeption Aufbau und Messtechnik	Monat 3	IZES	Monat 3
Aufbau	Aufbau Laborwand	Monat 11	IZES	Monat 10
Messungen	Untersuchungen an der Laborwand	Monat 14	IZES	Monat 12
Simulation	Simulationsmodell	Monat 15	IZES	Monat 14
Bericht	Abschlussbericht "Laborwand"	Monat 19	IZES	13.02.2013
Bericht	Abschlussbericht "Theorie aLT"	Monat 19	G. Luther	16.01.2013

² Inbetriebnahme der WP am Prüfstand in Saarbrücken am 21.03.2013

3.3.3.1 Zusätzlich notwendige Arbeiten in AP3:

Teil des AP3 war die Aufstellung eines Simulationsmodells für die aLT in der Simulationsumgebung „TRNSYS“. Hier konnte im Vorfeld des Projekts ein existierendes Type³ ausfindig gemacht und, entsprechend der vorhandenen Dokumentation und der mathematischen Beschreibung, als geeignet identifiziert werden. Bei der detaillierten Arbeit mit dem Type und Vergleichen mit den Messergebnissen wurden Abweichungen zwischen Simulation und Messung ermittelt, die sich im Endeffekt als Resultat von Fehlern in der Dokumentation des Types herausstellten. Zusammen mit dem deutschen Ansprechpartner der Software „TRNSYS“ konnte diese Problematik erörtert und gelöst werden.

3.3.4 Projektverlängerung und Aufstockung

Mit dem Zuwendungsbescheid vom 25.11.2011 wurde das Projekt mit einer Laufzeit vom 01.01.2012 bis zum 31.12.2014 bewilligt. Eine erste Verlängerung fand in 2013 statt (siehe Änderungsbescheid vom 17.10.2013). Der Bewilligungszeitraum wurde bis zum 31.12.2015 ausgedehnt. Die nächste Verlängerung fand in 2015 statt (siehe Änderungsbescheid vom 27.07.2015). Das Projekt wurde bis 31.07.2017 verlängert. In 2016 wurde das Projekt nochmals bis zum 30.04.2018 verlängert, siehe Änderungsbescheid vom 24.05.2016. Im Zuge der Aufstockung des Projekts wurde LEXU II in 2017 nochmals bis zum 30.09.2018 verlängert, siehe Zuwendungsbescheid vom 13.03.2017. Die letzte Projektverlängerung fand in 2018 statt (siehe Änderungsbescheid vom 05.09.2018). Das Projektende wurde auf den 31.12.2019 festgelegt und das Projekt zu diesem Datum inhaltlich abgeschlossen.

³ Type 1230 „Ventilated air cavity wall“, Thornton (2007); Bestandteil der TESS Library in TRNSYS

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

4.1 Theoretische Grundlagen der außenliegenden Wandtemperierung

Die theoretischen Grundlagen der aWT wurden bereits in dem Vorprojekt LEXU erarbeitet. Die folgende aktuelle Aufbereitung der Grundlagen ist Schmidt (2019) (siehe auch Anhang) entnommen und wurde u.a. auch in Schmidt et al. (2017) veröffentlicht.

Die Grundlagen der thermischen Modellierung von Rohrsystemen in Bauteilen können den entsprechenden Standard-Werken wie Glück (1999), Glück (1982) und Koschützky & Lehmann (2000) entnommen werden. Bei der aWT handelt es sich um einen Spezialfall bzw. Sonderfall der thermoaktiven Bauteilsysteme (TABS). Üblicherweise befinden sich die Rohrleitungen in TABS entweder mittig in der Bauteilkonstruktion oder werden oberflächennah zum Innenraum umgesetzt. Bei der aWT handelt es sich somit um ein oberflächenfernes thermoaktives Bauteilsystem für den Gebäude-Bestand. Die Idee der aWT wurde von Altgeld & Luther im Jahr 2002 erstmals veröffentlicht und im Rahmen des Forschungsprojektes LEXU (BMW-FKZ 032730T) weiterführend bearbeitet, siehe Luther (2008). Die im Folgenden dargestellten theoretischen Betrachtungen basieren auf den beiden oben genannten Veröffentlichungen, mit aktuellen Ergänzungen und Anpassungen. Die theoretischen Grundlagen und Kennwerte wurden zusätzlich in einer einheitlichen Form und Nomenklatur veröffentlicht, siehe Schmidt et al. (2017). Wie die Bezeichnung „außenliegende Wandtemperierung“ bereits ausdrückt, handelt es sich bei der aWT um eine Temperierung der Außenwand, also eines vertikalen Bauteils. Bei der aWT wird eine Temperierungsebene zwischen Bestandswand und einem neuen WDVS aufgebracht. Die Idee der aWT beinhaltet die folgenden Besonderheiten:

1) Lage der Temperierungsebene:

Bei dem typischen Aufbau der aWT, entsprechend Abbildung 4, liegt die Temperierungsebene außen auf der Bestandswand und bei reiner Betrachtung der Abstände d_1 und d_2 näher an der Außenoberfläche. Bei Betrachtung der thermischen Widerstände R_1 und R_2 liegt die Temperierungsebene jedoch näher an der Innenoberfläche, durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des WDVS im Vergleich zur Bestandswand ($\lambda_{Dämmung} \ll \lambda_{Wand}$). Lagebedingt können in der aWT sehr geringe Fluidtemperaturen nutzbar gemacht werden; sogar Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur können theoretisch nutzbar gemacht werden, siehe Kapitel 4.1.1.

2) Eignung für den Bestand bzw. die Bestandssanierung:

Der Fokus der Anwendung der aWT liegt auf der Bestandssanierung. Mit Hilfe der aWT ist es möglich die Vorteile einer Flächentemperierung (geringe Vorlauftemperaturen, thermische Behaglichkeit, kein Platzverlust durch Heizkörper usw.) auch für Bestandsgebäude nutzbar zu machen. Dies gilt insbesondere für Bestandsgebäude, bei denen der nachträgliche Einbau einer Fußbodenheizung aus diversen Gründen nicht möglich ist (Deckenhöhe, Freizug, Aufwand usw.). Hier kommt ein weiterer wesentlicher Aspekt der aWT zum Tragen. Die aWT kann von außen aufgebracht werden, ohne (wesentliche) Arbeiten im Inneren des Gebäudes. Demzufolge ist eine Sanierung im bewohnten Zustand von außen möglich, ohne Freizug des Gebäudes.

3) Temperierung:

Die aWT kann den Raum heizen und kühlen. Neben der Beheizung steht somit auch die Kühlung im Fokus. Dies ist insbesondere für Nicht-Wohngebäude interessant. Über die aWT kann somit auch eine Kühlung im Gebäudebestand realisiert werden.

4) Thermische Aktivierung der Bestandsstruktur:

Zugleich wird die Bestandsstruktur des Gebäudes thermisch aktiviert und kann auf diesem Weg als thermischer Speicher (für Wärme & Kälte) nutzbar gemacht werden.

5) Trägheit der aWT:

Die Trägheit der aWT, maßgeblich verursacht durch die Bestandsstruktur, hat hier einen positiven Effekt. Die Erzeugung und die Abgabe der Wärme/Kühle können zeitlich entkoppelt werden. Auf diesem Weg können Lastspitzen vermieden werden. Aus Regelungssicht ist die Trägheit jedoch auch ein negativer Aspekt, insbesondere, wenn hohe Deckungsanteile mit der aWT erzielt werden sollen (über die Grundlasttemperierung hinaus).

4.1.1 Stationäres Modell der aWT

Um das allgemeine Modell von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS) auf den Spezialfall der außenliegenden Wandtemperierung (aWT) zu übertragen, wird ein beispielhafter Standard-Wandaufbau der aWT verwendet, siehe Abbildung 4 und Tabelle 6. Bei diesem Standard-Wandaufbau handelt es sich um eine massive, einschalige Bestandswand, bestehend aus Innenputz und Mauerwerk mit altem Außenputz, auf die ein Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) aufgebracht wird. In die Schnittstelle zwischen Bestandswand und neuem WDVS wird in einer zusätzlichen Putzschicht ein Temperierungssystem eingebracht. Das WDVS wird vereinfacht mit einer Schicht Wärmedämmung und einem Außenputz angenommen.

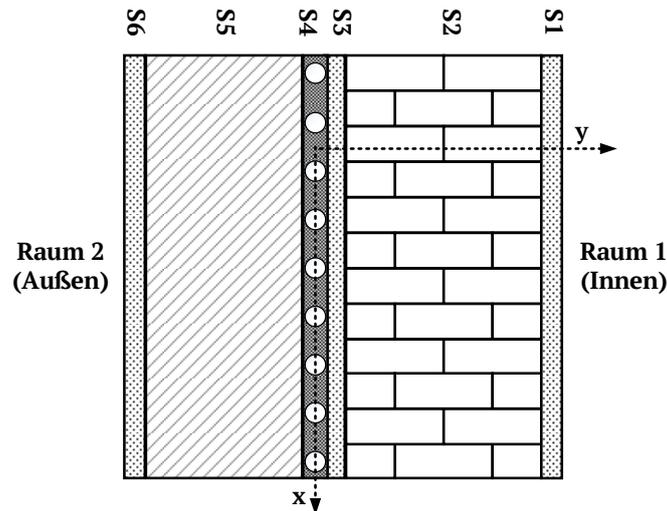


Abbildung 4: Schichtaufbau des aWT-Modells

Tabelle 6: Schichtaufbau für den in Abbildung 4 dargestellten Standard-Fall der aWT

Schicht	Name	Material	Bemerkung
S1	Innenputz	Gipsputz	Bestandswand
S2	Bestandswand	divers (z.B. Ziegel, Beton)	
S3	Außenputz (alt)	Kalkzementputz	
S4	Temperierungsebene	Kleb mortel mit Rohren	neuer Wandaufbau
S5	Wärmedämmung	divers (z.B. EPS)	
S6	Außenputz	Kalkzementputz	

Das allgemeine Modell für TABS entsprechend Koschenz & Lehmann (2000) wird durch einige Änderungen an das Modell der aWT angepasst. Da es sich bei der aWT um eine Temperierung einer Außenwand handelt, kann Raum 1 als Innenraum definiert und Raum 2 als Außenluft/Umgebung definiert werden. Meistens handelt es sich bei TABS eher um horizontale Bauteile, bei der aWT jedoch um ein vertikales Bauteil, daher wird das Modell gedreht und die Anordnung der Achsen vertauscht, siehe Abbildung 5. Auch das Gesamt-Widerstandsnetzwerk nach Koschenz & Lehmann (2000) kann mit kleinen Änderungen für die aWT übernommen werden. Dies ist unabhängig davon, ob es sich bei der aWT um ein System mit Kapillarrohrmatten 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. Die Ermittlung der entsprechend äquivalenten Widerstände kann Koschenz & Lehmann (2000) entnommen werden.

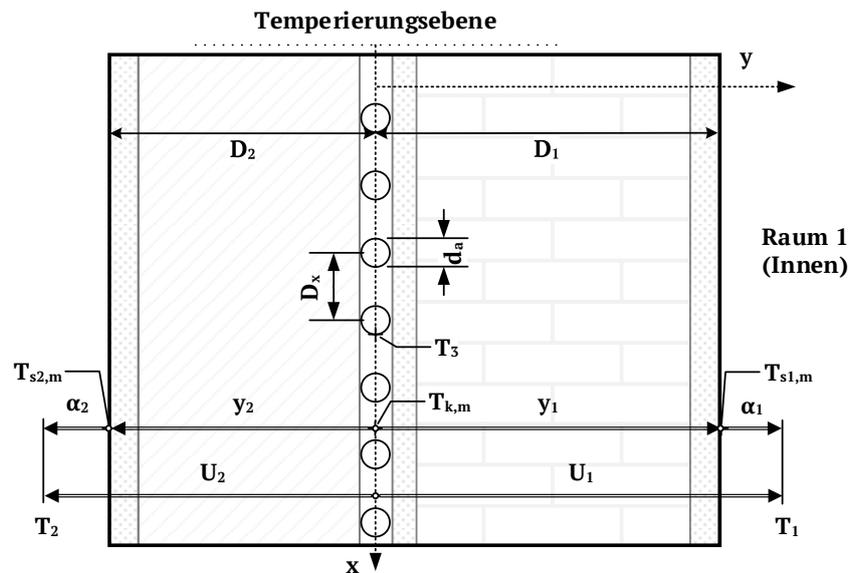


Abbildung 5: Übertragung des TABS-Modells nach Koschencz & Lehmann (2000) auf die aWT

Mit:

- d_a Rohrdurchmesser (außen) [m]
- D_x Rohrabstand in x-Richtung [m]
- $D_{1,2}$ Abstand der Rohrebene von den Oberflächen (Raum 1/Raum 2) [m]
- $T_{1,2}$ Temperatur der angrenzenden Räume [°C]
- T_3 Oberflächentemperatur der Rohre in der Temperierungsebene [°C]
- $T_{s1,2,m}$ Mittlere Oberflächentemp. der beiden Grenzflächen (Raum 1/Raum 2) [°C]
- $\alpha_{1,2}$ Wärmeübergangskoeffizient von der Oberfläche in den Raum [W/(m²K)]
- $y_{1,2}$ Wärmedurchgangswiderstand von der Rohrebene zu den Oberflächen
- $U_{1,2}$ Wärmedurchgangskoeffizient von der Rohrebene in die Räume [W/(m²K)]

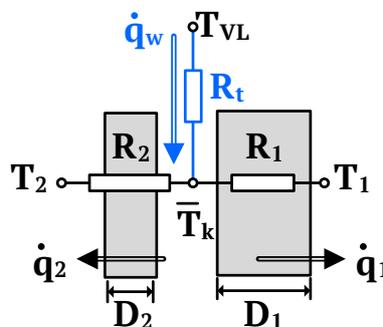


Abbildung 6: Übertrag des Gesamt-Widerstandsnetzwerks von TABS zwischen der Vorlauftemperatur TVL und beiden Temperaturen T1 & T2 auf den Spezialfall der aWT

Im Folgenden werden die theoretischen, physikalischen Grundlagen der aWT für ein stationäres, eindimensionales Modell dargestellt, entsprechend Luther & Altgeld (2002) und Luther (2008). Mit folgenden Annahmen:

- Homogene Wärmeübergänge und Temperaturverteilung in den Schichten.
- Alle thermischen Widerstände und Wärmeströme beziehen sich auf die Einheits-Wandfläche von 1 m². 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. Daher ist es für die folgende Betrachtung auch nicht relevant, um welches Rohrsystem es sich bei der aWT handelt.

4.1.1.1 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.

Verlustwärmestrom durch Transmission im Ruhezustand

Bei konstanter Innentemperatur (T_1) und Außentemperatur (T_2) und dem Wärmedurchgangskoeffizienten der gesamten Außenwand (U_{ges}) ergibt sich der Verlustwärmestrom durch Transmission (\dot{Q}_0) zu:

$$\dot{Q}_0 = U_{ges} \cdot (T_1 - T_2) \cdot A \quad (1)$$

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 den Widerstand von der Temperierungsebene nach innen und R_2 den entsprechenden Widerstand nach außen:

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

$$R_1 = 1/\alpha_1 + \frac{D_{S1}}{\lambda_{S1}} + \frac{D_{S2}}{\lambda_{S2}} + \frac{D_{S3}}{3} + \frac{0,5 \cdot D_{S4}}{\lambda_{S4}} \quad (3)$$

$$R_2 = 1/\alpha_2 + \frac{D_{S5}}{\lambda_{S5}} + \frac{D_{S6}}{\lambda_{S6}} + \frac{0,5 \cdot D_{S4}}{\lambda_{S4}} \quad (4)$$

Der Verlustwärmestrom \dot{Q}_0 wird im Zusammenhang mit der aWT h auch als „Ruhewärmestrom“ oder „Ruhestrom“ bezeichnet. Dieser Wärmestrom fließt, entsprechend dem Temperaturgradienten, von innen nach außen und ist über den Wandquerschnitt, unabhängig von der Betrachtungsebene, konstant.

Ruhetemperatur

Im Ruhezustand ergibt sich für die Knotentemperatur T_k eine bestimmte Temperatur, im Folgenden als „Ruhetemperatur“ $T_{k,0}$ 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 \dot{Q}_0 über die Außenwand konstant ist, lässt er sich auch über die folgenden Ansätze mit Bezug auf die Ruhetemperatur berechnen:

$$\dot{Q}_0 = \frac{1}{R_2} \cdot (T_{k,0} - T_2) \cdot A \quad (5)$$

$$\dot{Q}_0 = \frac{1}{R_1} \cdot (T_1 - T_{k,0}) \cdot A \quad (6)$$

Setzt man Gleichung (5) in Gleichung (1) ein, so ergibt sich für die Ruhetemperatur:

$$T_{k,0} = U_{ges} \cdot R_2 \cdot (T_1 - T_2) + T_2 \quad (7)$$

Geht man von einer nahezu konstanten Raumtemperatur ($T_1 = 20^\circ\text{C}$) 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 α_2 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.

4.1.1.2 Betriebsmodi der aWT

Nach Aktivierung der aWT wird der Wand der Heizstrom \dot{Q}_w zugeführt bzw. aufgeprägt. Durch diesen Wärmestrom verändert sich die Ruhetemperatur T_{k0} in der Heizebene und es ergibt sich eine neue Temperatur T_k . Relevant ist hier in erster Linie der resultierende Temperaturgradient zum Innenraum ($T_k - T_1$), siehe Abbildung 7. Entsprechend der neuen Temperatur in der Heizebene T_k können drei verschiedene, generelle Betriebsweisen der aWT unterschieden werden:

- **Teilkompensatorischer Betrieb:** $T_{k,0} < T_k < T_1$
- **Kompensatorischer Betrieb:** $T_{k,0} < T_k = T_1$
- **Überkompensatorischer Betrieb:** $T_{k,0} < T_k > T_1$

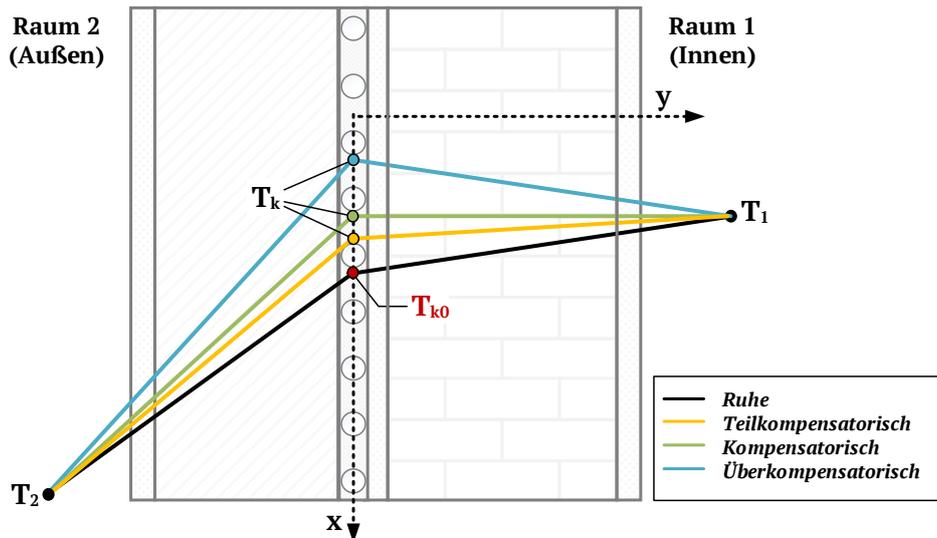


Abbildung 7: Schematische Änderung der Ruhetemperatur durch den Betrieb der aWT und Zuordnung der Betriebsituationen

Die resultierenden Wärmeströme in der Wand können auf zwei unterschiedlichen Wegen berechnet werden. Ein Überblick ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier ist die Richtung der Wärmeströme zu beachten, da diese sich teilweise überlagern. Die Richtungspfeile in Abbildung 8 bzw. in den folgenden Annahmen wurden so gewählt, dass diese als positiv gezählt werden:

- Der Ruhestrom \dot{Q}_0 von innen nach außen.
- Der in der Temperierungsebene eingebrachte Wärmestrom \dot{Q}_w .
- Die sonstigen Wärmeströme in Richtung von der Temperierungsebene weg.

Der eingebrachte Wärmestrom \dot{Q}_w teilt sich auf in einen Anteil, der nach innen fließt ($\dot{Q}_{w,1}$), und einen Anteil, der als Verlust zur Umgebung hin abfließt ($\dot{Q}_{w,2}$). Gleichzeitig muss der eingebrachte Wärmestrom jedoch auch der Summe der resultierenden Wärmeströme (\dot{Q}_1 und \dot{Q}_2) entsprechen.

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{w,1} + \dot{Q}_{w,2} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (9)$$

Im Folgenden wird also unterschieden in theoretische und resultierende Wärmeströme:

Theoretische Wärmeströme

Bei den beiden Wärmeströmen ($\dot{Q}_{w,1}$ und $\dot{Q}_{w,2}$) handelt es sich nicht um real existierende (messbare) Wärmeströme, sondern um theoretisch berechenbare. In dem Bauteil werden sich entsprechend dem Überlagerungsprinzip (Superpositionsprinzip) die (messbaren) Wärmeströme \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 einstellen. Der Begriff „Überlagerungsprinzip“ bedeutet hier, dass der

ungestörte Temperaturverlauf bzw. der Ruhewärmestrom (\dot{Q}_0) durch den neu aufgeprägten Heizwärmestrom (\dot{Q}_w) und dessen Aufteilung nach innen ($\dot{Q}_{w,1}$) und außen ($\dot{Q}_{w,2}$) überlagert wird. Diese Überlagerung kann nach dem Superpositionsprinzip auch getrennt betrachtet/berechnet werden:

- 1) Betrachtung des Ruhewärmestroms \dot{Q}_0 mit der Temperaturdifferenz (T_1-T_2) und dem Wärmedurchgangskoeffizienten U_{ges} (siehe vorheriger Abschnitt).
- 2) Berechnung der Aufteilung des Wärmestroms \dot{Q}_w in $\dot{Q}_{w,1}$ und $\dot{Q}_{w,2}$. Die Aufteilung berechnet sich dabei nach den Kirchhoff'schen 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 Heizwärmestrom \dot{Q}_w teilt sich in die beiden theoretischen Wärmeströme $\dot{Q}_{w,1}$ und $\dot{Q}_{w,2}$ auf, entsprechend der Widerstände R_1 bzw. R_2 in Relation zum gesamten Widerstand R_1+R_2 .

$$\dot{Q}_{w,1} = \dot{Q}_w \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \dot{Q}_w \cdot R_2 \cdot U_{ges} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{w,2} = \dot{Q}_w \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \dot{Q}_w \cdot R_1 \cdot U_{ges} \quad (11)$$

Resultierende Wärmeströme

Entsprechend dem Schema in Abbildung 8 ergeben sich die resultierenden Wärmeströme durch Überlagerung der theoretischen Wärmeströme im Bauteil:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{w,1} - \dot{Q}_0 \quad (12)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{w,2} + \dot{Q}_0 \quad (13)$$

Der Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass die Kerntemperatur T_k für die Berechnung nicht benötigt wird und der aufgeprägte (eingebrachte) Heiz-Wärmestrom \dot{Q}_w einfach messbar ist. Die beiden messbaren Wärmeströme \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 können jedoch auch über die Kerntemperatur T_k und die jeweiligen Widerstände (R_1 bzw. R_2) berechnet werden:

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (14)$$

$$\dot{Q}_1 = \frac{(T_k - T_1)}{R_1} \cdot A \quad (15)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{(T_k - T_2)}{R_2} \cdot A \quad (16)$$

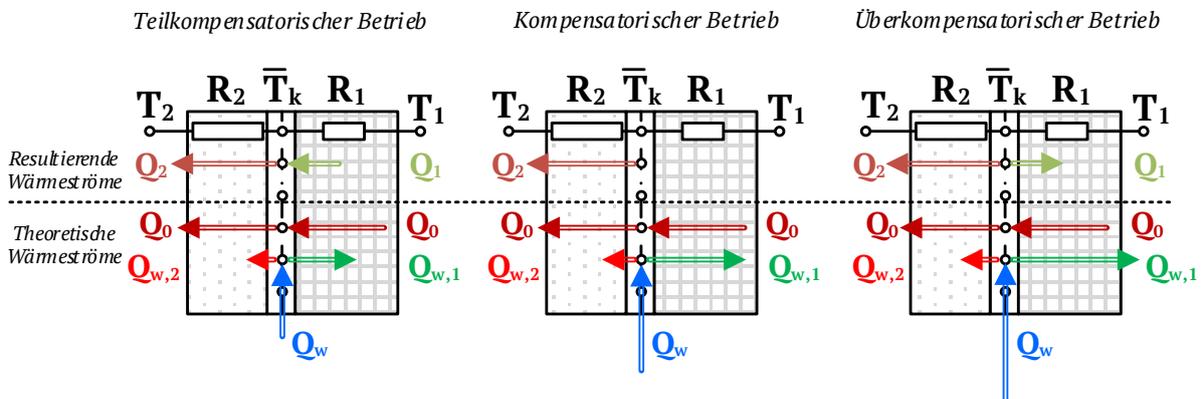


Abbildung 8: Schema der theoretischen und resultierenden Wärmeströme für den teilkompensatorischen Betrieb, den kompensatorischen Betrieb und überkompensatorischen Betrieb

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 Verluste 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 \dot{Q}_1 negative Werte annimmt, da $\dot{Q}_{w,1}$ betragsmäßig kleiner \dot{Q}_0 ist, siehe Abbildung 8. Es verbleibt somit ein „Rest“ an Transmissionswärmeverlusten, die aus dem Raum 1 stammen.

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 $\dot{Q}_{w,1}$ entspricht dem Ruhewärmestrom \dot{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 \dot{Q}_w ist hierbei um $\dot{Q}_{w,2}$ größer als der Ruhewärmestrom \dot{Q}_0 . Zur vollständigen Kompensation der Transmissionswärmeverluste aus dem Innenraum wird der Heiz-Wärmestrom \dot{Q}_w benötigt. Dieser wird als Kompensationswärmestrom $\dot{Q}_{w,komp}$ bezeichnet und mit Hilfe von Gleichung (14) bis (16) berechnet:

$$\dot{Q}_1 = 0 \Rightarrow \dot{Q}_{w,1} = \dot{Q}_0 \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{w,k} \cdot R_2 \cdot U_{ges} = U_{ges} \cdot (T_1 - T_2) \cdot A \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{w,komp} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_2} \cdot A \quad (19)$$

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 $\dot{Q}_{w,1}$ größer als \dot{Q}_0 und es ergibt sich ein positiver Wert für den Nutzwärmestrom \dot{Q}_1 . Soll ein bestimmter effektiver Heizwärmestrom \dot{Q}_1 in den Raum erreicht werden, so kann der notwendige Temperaturhub ΔT_k in der Temperierungsebene über die Raumtemperatur hinaus folgendermaßen bestimmt werden:

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

$$\text{Mit } \dot{Q}_1 = \frac{(T_k - T_1)}{R_1} \cdot A \Rightarrow \Delta T_{k,1} = \frac{\dot{Q}_1 \cdot R_1}{A} \quad (21)$$

4.1.1.3 Kennwerte des aWT-Modells

Ausnutzungsfaktor bzw. Wirkungsgrad der aWT

In Luther & Altgeld (2002) wurde für die aWT ein Ausnutzungsfaktor η_{aWT} definiert. Für diesen Ausnutzungsgrad wird der nach innen fließende, theoretische Wärmestrom $\dot{Q}_{w,1}$ als Nutzen definiert und der gesamte über die Temperierungsebene zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_w als Aufwand. Dementsprechend ergibt sich der Ausnutzungsfaktor zu:

$$\eta_{aWT} = \frac{\dot{Q}_{w,1}}{\dot{Q}_w} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_0}{\dot{Q}_w} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (22)$$

Über die Projektlaufzeit hat sich für den Ausnutzungsfaktor die Bezeichnung „Wirkungsgrad“ bzw. „energetischer Wirkungsgrad“ der aWT etabliert. Unter Verwendung von Gleichung (10) und Gleichung (14) lässt sich der Ausnutzungsfaktor bzw. der energetische Wirkungsgrad der aWT alleine auf die Wärmeübergangswiderstände und beinhalteten Wärmeübergangskoeffizienten zurückführen:

$$\eta_{aWT} = \frac{\dot{Q}_{w,1}}{\dot{Q}_w} = \frac{\dot{Q}_w \cdot \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot R_2}{\dot{Q}_w} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = R_2 \cdot U_{ges} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (23)$$

Zusammengefasst, hängt der Wirkungsgrad der aWT also alleine vom Verhältnis der thermischen Widerstände ab, unabhängig von der Temperaturdifferenz und dem Heizwärmestrom \dot{Q}_w . Dies ist auch der große Vorteil dieser Definition. Durch die Einbeziehung des Ruhewärmestroms \dot{Q}_0 (in $\dot{Q}_{w,1}$) gilt der Wirkungsgrad für jeden Betriebsfall der Wandtemperierung.

Durch Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes R_2 kann der Wirkungsgrad der aWT beliebig nahe an 100% gebracht werden. Mit sinnvollen Dämmstärken sind bei üblichen Bestandswänden jedoch maximal Werte bis 95% erreichbar. Angestrebt werden Werte >80%. In Abbildung 9 ist für Bestandswände mit einem U-Wert von 0.5 bis 2 W/(m²K) der resultierende energetische Wirkungsgrad der aWT aufgetragen, bei Anbringung eines WDVS zwischen 10 und 300 mm.

Entsprechend der aktuellen Version der DIN EN 1264 (Teil 4, Tabelle 1) wird für Wandheizungen, die an die Außenluft grenzen, ein Wärmeleitwiderstand von 2 (m²K)/W zwischen den Leitungen und der Umgebung gefordert (entspricht R_2). Für das Beispiel in Abbildung 9 wird die Forderung aus der Norm ab einer Dämmstärke von rund 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 (maximal 84%). Betreffend die außenliegende Wandtemperierung wäre hier ein zusätzlicher Bezug auf den Wärmeleitwiderstand nach innen (R_1 bzw. U-Wert der Bestandswand) sinnvoll. Da sich der Wirkungsgrad der aWT alleine über die thermischen Widerstände berechnen lässt, besteht auch eine Abhängigkeit vom neuen U-Wert der sanierten Außenwand, siehe Abbildung 10.

Die folgenden Aussagen können Abbildung 9 & Abbildung 10 entnommen werden:

- Bei Einsatz der aWT müsste die entsprechende Außenwand, unabhängig von der Bestandsstruktur, mit 80 mm WLG035 gedämmt werden, um die Anforderungen nach DIN EN1264-1 (2011) zu erfüllen.
- Selbst bei sehr großen Dämmstärken liegt der Wirkungsgrad der aWT bei maximal rund 95%. Ein Wirkungsgrad von 100% ist somit rechnerisch möglich, praktisch jedoch weder umsetzbar noch wirtschaftlich sinnvoll.
- Wird die Anforderung $\eta_{aWT} > 85\%$ erfüllt, liegt auch die Verbesserung des U-Wertes der Bestandswand in dieser Größenordnung. Und somit auch die Reduktion der Transmissionswärmeverluste der entsprechenden Flächen im Vergleich zum Ausgangszustand.
- Im Bereich üblicher Dämmstärken (bis 200 mm) für Außenwände und üblicher U-Werte im Bestand (1-2 W/m²K) werden Wirkungsgrade der aWT zwischen 75 und 93% erzielt.

U-Wert [W/m ² K]	Dämmstärke WDVS [mm]																	
	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
0.5	15%	25%	32%	38%	43%	48%	55%	60%	64%	67%	70%	73%	75%	76%	78%	79%	80%	82%
0.6	18%	28%	36%	43%	48%	52%	59%	64%	68%	71%	74%	76%	78%	80%	81%	82%	83%	84%
0.7	20%	32%	40%	47%	52%	56%	63%	68%	72%	75%	77%	79%	81%	82%	83%	84%	85%	86%
0.8	23%	35%	43%	50%	55%	60%	66%	71%	74%	77%	79%	81%	83%	84%	85%	86%	87%	88%
0.9	25%	37%	46%	53%	58%	62%	69%	73%	77%	79%	81%	83%	84%	86%	87%	87%	88%	89%
1.0	27%	40%	49%	56%	61%	65%	71%	75%	78%	81%	83%	84%	86%	87%	88%	89%	89%	90%
1.1	29%	42%	52%	58%	63%	67%	73%	77%	80%	82%	84%	86%	87%	88%	89%	90%	90%	91%
1.2	31%	45%	54%	60%	65%	69%	75%	79%	82%	84%	85%	87%	88%	89%	90%	90%	91%	92%
1.3	33%	47%	56%	62%	67%	71%	76%	80%	83%	85%	86%	88%	89%	90%	90%	91%	92%	92%
1.4	34%	49%	58%	64%	69%	73%	78%	81%	84%	86%	87%	89%	90%	90%	91%	92%	92%	93%
1.5	36%	51%	60%	66%	70%	74%	79%	82%	85%	87%	88%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%
1.6	38%	52%	61%	67%	72%	75%	80%	83%	86%	87%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%	94%
1.7	39%	54%	63%	69%	73%	76%	81%	84%	86%	88%	89%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%
1.8	41%	55%	64%	70%	74%	78%	82%	85%	87%	89%	90%	91%	92%	92%	93%	94%	94%	94%
1.9	42%	57%	66%	71%	75%	79%	83%	86%	88%	89%	91%	91%	92%	93%	93%	94%	94%	95%
2.0	44%	58%	67%	72%	76%	79%	84%	86%	88%	90%	91%	92%	93%	93%	94%	94%	95%	95%

Abbildung 9: Wirkungsgrad der aWT in Abhängigkeit des U-Wertes der Bestandswand und der Dämmstärke des WDVS (WLG 035). Zusätzlich zu der Wärmedämmung wurden für R2 noch eine 20 mm dicke Putzschicht und der äußere Wärmeübergangswiderstand mit 0.04 W/(m²K) angesetzt

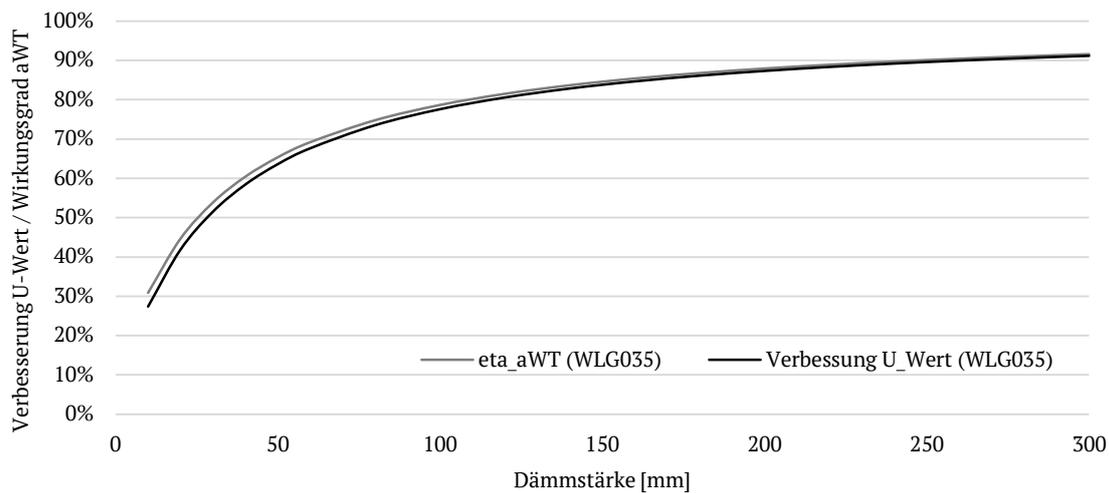


Abbildung 10: Vergleich des Verlaufs von verbessertem U-Wert (1-Ualt/Uneu) [%] und des Wirkungsgrades der aWT [%] mit steigender Dämmstärke (WLG035) für eine Bestandswand mit einem U-Wert von 1 [W/(m²K)]

Aufteilungsfaktor

Für die Berechnung des Wirkungsgrades der Wandtemperierung wird der Wärmestrom \dot{Q}_0 benötigt, oder der U-Wert des Wandaufbaus. Der U-Wert wiederum ist von den angesetzten Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen abhängig. Diese sind u.a. auch abhängig von der Oberflächentemperatur, welche von der Wandtemperierung maßgebend verändert werden kann. Unter anderem aus diesem Grund wird im Zusammenhang mit der Theorie der aWT auch von „theoretischen Wärmeströmen“ gesprochen. Diese können nicht gemessen werden und gelten für die theoretischen Annahmen. Es bietet sich daher an als Ergänzung zum Wirkungsgrad einen Aufteilungsfaktor zu definieren. Dieser Aufteilungsfaktor bezieht den (messbaren) Nutzwärmestrom \dot{Q}_1 auf den (ebenfalls messbaren) Heizwärmestrom \dot{Q}_w . Dementsprechend ergibt sich der Aufteilungsfaktor zu:

$$f_{split,aWT} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_w} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2} \cdot 100 \text{ [%]} \tag{24}$$

Der Unterschied zwischen η_{aWT} und $f_{split,aWT}$ soll an einem Beispiel aus Abbildung 9 verdeutlicht werden. Für eine Bestandswand mit einem U-Wert von 1.5 W/(m²K) und einem neuen WDVS von 120 mm (WLG035) ergibt sich aus Abbildung 9 ein Wirkungsgrad von $\eta_{aWT} = 85\%$. Unter Verwendung der Standard-Wärmeübergangskoeffizienten für innen und außen ergibt sich für diese Außenwand ein neuer Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient von 0.24 W/(m²K). Der Wärmedurchgangskoeffizient von der Ebene der thermischen Aktivierung nach innen beträgt rund 1.60 W/(m²K) und derjenige nach außen 0.29 W/(m²K). Geht man als Vereinfachung davon aus, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten nicht verändern und dass durch die thermische Aktivierung eine Kerntemperatur von 30°C erreicht wird, so ergeben sich für verschiedene Umgebungstemperaturen, bei konstanter Raumtemperatur die folgenden Ergebnisse:

Tabelle 7: Vergleich von η_{aWT} und $f_{split,aWT}$ für ein vereinfachtes Beispiel

T _{amb} [°C]	T _{k,aWT} [°C]	T _{Raum} [°C]	\dot{Q}_0 [W/m ²]	\dot{Q}_1 [W/m ²]	\dot{Q}_2 [W/m ²]	\dot{Q}_w [W/m ²]	η_{aWT} [%]	$f_{split,aWT}$ [%]
-10	30	20	7.3	16.0	11.4	27.4	84.8	58.2
-5			6.1	16.0	10.0	26.0	84.8	61.4
0			4.8	16.0	8.6	24.5	84.8	65.0
10			2.4	16.0	5.7	21.7	84.8	73.6
15			1.2	16.0	4.3	20.2	84.8	78.8

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 7 erkennt man, dass der Wirkungsgrad η_{aWT} durch den Bezug zu \dot{Q}_0 unabhängig von der Betriebssituation ist. Für den Aufteilungsfaktor $f_{split,aWT}$ ergeben sich je nach Betriebssituation (hier Umgebungstemperatur) deutlich unterschiedliche Werte. Diese ergeben sich aus der Relation der spezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten (U_i & U_a) und dem treibenden Temperaturgefälle.

Somit eignet sich η_{aWT} vor allem für die grundlegende Überprüfung und Charakterisierung von Wandaufbauten mit thermischer Aktivierung und $f_{split,aWT}$ für eine spezifische Betrachtung der auftretenden Betriebssituationen und Wärmeströme. Insbesondere kann $f_{split,aWT}$ sehr gut für den Vergleich zwischen Messung, Simulation und Berechnung verwendet werden. Dabei ist auch zu beachten, wie sich der Wärmedurchgangskoeffizient von der theoretischen Betrachtung (Normwerte für innen und außen) über die thermische Aktivierung (Werte für erhöhte Oberflächentemperaturen) bis hin zur Messung verändert. Während der Wirkungsgrad der aWT definitionsgemäß ausschließlich bauteilabhängig ist, ist also der Aufteilungsfaktor betriebsabhängig und bauteilabhängig. Der folgende Zusammenhang gilt zwischen dem Aufteilungsfaktor und dem Wirkungsgrad:

$$f_{split,aWT} = \eta_{aWT} - \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_w} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$

Deckungsgrad der Transmissionswärmeverluste

Der Deckungsgrad der Transmissionswärmeverluste $\beta_{T,aWT}$ zeigt an, welcher Anteil der Transmissionswärmeverluste durch die aWT gedeckt/kompensiert wird. Der Kennwert ist somit primär für den teil- bzw. kompensatorischen Betrieb relevant.

$$\beta_{T,aWT} = \frac{\dot{Q}_{w,1}}{\dot{Q}_0} \cdot 100 [\%] \quad (26)$$

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde von der gemeinnützigen Forschungseinrichtung IZES gGmbH geleitet. Auf wissenschaftlicher Seite wurde das Projekt durch die Mitarbeit von Dr. Gerhard Luther und Prof. Dr. Horst Altgeld (WIDAG) ergänzt. Zeitweise konnte auch die Universität des Saarlandes (Lehrstuhl AES) in das Projekt integriert werden. Dem gegenüber wurden Industriepartner aus allen relevanten Bereichen als assoziierte Partner bzw. Unterauftragnehmer in das Projekt integriert. Das entsprechende Konsortium kann Kapitel 2.2 entnommen werden.

II Eingehende Darstellung

Im Folgenden wird der Verlauf des Projekts LEXU II ausführlich beschrieben.

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Folgenden werden die Arbeiten und Ergebnisse beschrieben, die durch die IZES gGmbH ausgeführt bzw. erreicht wurden. Dabei werden nur die Arbeiten an AP1 dargestellt. Die Arbeiten von AP2 und AP3 sind bereits seit längerer Zeit abgeschlossen und die Ergebnisse können den Endberichten der Arbeitspakete entnommen werden, siehe Anhang. Große Teile der folgenden Beschreibungen sind einer Dissertation entnommen, die im Kontext des Projektes durchgeführt wurde, siehe Schmidt (2019) (Anhang).

1.1 Erarbeitung der theoretischen Grundlagen der aLT

Erweitert man den Schichtaufbau der aWT entsprechend Abbildung 4 um einen Luftspalt zwischen thermisch aktiver Schicht und dem WDVS, so kann die aWT zu einer außenliegenden Lufttemperierung (aLT) erweitert werden, siehe Abbildung 11. Die Idee der aLT wurde zusammen mit Dr. Luther erarbeitet, siehe u.a. Luther (2008), Hau (2010) und Luther (2013). Auch in Glück (2008) wird die Idee der Ergänzung von TABS durch einen Luftstrom aufgegriffen. In beiden Fällen wird der Luftstrom als ideale Unterstützung der (trägen) Raumtemperierung von TABS betrachtet. Die Erwärmung der Luft im Luftspalt erfolgt hierbei durch den Wärmestrom, der von der thermischen Aktivierung nach außen fließt (\dot{Q}_2 oder \dot{Q}_0). Dies kann auch als eine Art Wärmerückgewinnung betrachtet werden. Generell können die Besonderheiten der aWT aus Kapitel I4.1 auch für die aLT übernommen werden. Bei der aLT können zusätzlich die folgenden Aspekte aufgeführt werden:

1) Regelbarkeit:

Die sehr träge aWT kann durch die aLT regelungstechnisch optimal ergänzt werden. Liegen die Zeitkonstanten bei der aWT im Stundenbereich, kann Wärme über die aLT im Minutenbereich zur Verfügung gestellt werden. Die aLT eignet sich daher auch für die Spitzenlastabdeckung. Mit der Kombination von aWT und aLT lässt sich somit auch eine komplette Beheizung/Temperierung eines Gebäudes sicherstellen, ohne inneres Heizsystem.

2) Anteil der Lüftungswärme:

Bei einer energetischen Sanierung entsprechend den gesetzlichen Standards erhöht sich der Anteil der Lüftungswärme am Gesamtwärmebedarf. Insofern erlangt die Frischluftherwärmung eine zunehmende Bedeutung (auch geregelte, bedarfsgerechte Zuführung von Frischluft). Bei der aLT wird dies ermöglicht, in Kombination mit dem Ansatz „von außen“. Auch der niederexergetische Ansatz der aWT/aLT kommt hier nochmal zum Tragen, die aLT ermöglicht die Zulufttemperierung auf niedrigem Temperaturniveau (mit geringen Temperaturdifferenzen).

3) Teilweise Rückgewinnung der intrinsischen Wärmeverluste der aWT:

Die Wärmeverluste der aWT (\dot{Q}_2) bzw. der Wand im Ruhezustand (\dot{Q}_0) können durch die aLT teilweise rückgewonnen und für die Erwärmung von Außenluft nutzbar gemacht werden. Im Endeffekt reduziert sich der Verlust-Wärmestrom \dot{Q}_2 geringfügig, im Vergleich zur aWT. Somit kann der Luftwärmestrom auch als eine Art Wärmerückgewinnung (Verminderung der Wärmeverluste) betrachtet werden.

4) Umlufttemperierung

Die Idee der aLT kann auch als Umlufttemperierung genutzt werden. Über eine solche Umlufttemperierung kann die Dynamik der Wandtemperierung erhöht und Lastspitzen abgefahren werden. Über den Luftstrom durch das Bauteil kann somit die Wärme/Kälte schnell mobilisiert werden und in die Raumluft übertragen werden.

1.1.1 Stationäres Modell der aLT

Vereinfacht man den grundsätzlichen Fall, so kann die aLT auch als ein Luftspalt betrachtet werden, in dem Luft mit einer konstanten Geschwindigkeit (w_L) strömt und durch die aWT von einem Ausgangs-Temperaturniveau auf ein End-Temperaturniveau erhöht wird. Die Innenseite des Luftspalts grenzt dabei an die thermisch aktivierte Schicht der aWT und die Außenseite des Luftspalts an eine Wärmedämmung, siehe Abbildung 11.

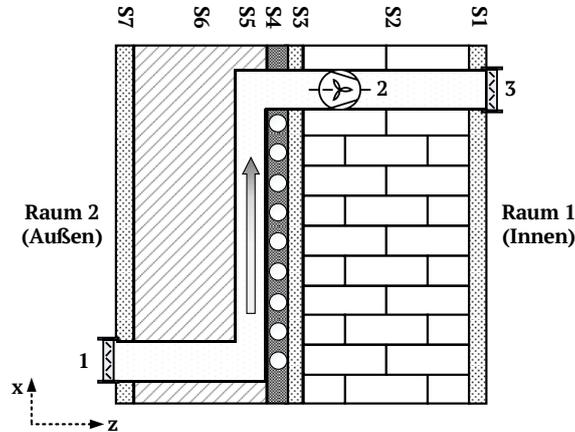


Abbildung 11: Schichtaufbau des aLT-Modells

Tabelle 8: Schichtaufbau für den in Abbildung 11 dargestellten Standard-Fall der aLT

Schicht	Name	Material / Funktion	Bemerkung
S1	Innenputz	Gipsputz	Bestandswand
S2	Bestandswand	divers (z.B. Ziegel, Beton)	
S3	Außenputz (alt)	Kalkzementputz	
S4	Temperierungsebene	Klebemörtel mit Rohren	Neuer Wandaufbau
S5	Luftspalt	-/-	
S6	Wärmedämmung	divers (z.B. EPS)	
S7	Außenputz	Kalkzementputz	Anlagentechnik
1	Außenklappe	Luft einlass / Verschluss	
2	(Axial)Ventilator	Strömungsmaschine	
3	Innenklappe	Luftauslass / Verschluss	

In Abbildung 12 ist ein solcher Luftkanal mit der Höhe „H“, der Breite „B“ und der Tiefe (Dicke des Luftspalts) „D_s“ dargestellt. Die Luft tritt in diesen Luftspalt mit Umgebungstemperatur (T_{amb}) ein und verlässt den Luftspalt mit der Temperatur $T_{L,e}$. Die Luftgeschwindigkeit w_L ist bekannt und konstant über die betrachtete Fläche. Dabei kann die aLT durch natürliche bzw. freie Konvektion oder erzwungene Konvektion (Ventilator) betrieben werden. Je nachdem kann die Berechnung entsprechend VDI (2013) für „senkrechte Kanäle“ (freie Konvektion) bzw. im „ebenen Spalt“ (erzwungene Konvektion) durchgeführt werden. Diese Berechnung betrifft primär den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Der Wärmeaustausch durch Strahlung kann (je nach Betriebsweise der aLT) den Großteil der Wärmeübertragungseffekte im Luftspalt ausmachen. Durch Strahlungsaustausch wärmen sich die Umrandungsflächen des Luftspalts auf (in Relation zur thermisch aktivierten Schicht). Von diesen Umrandungsflächen findet anschließend der konvektive Wärmeübergang an die vorbeiströmende Luft statt. Da es sich hierbei jedoch zumeist um instationäre Zustandsänderungen handelt, ist es wichtig den Luftkanal rechnerisch in einzelne Segmente oder Teilstücke zu zerlegen, siehe Abbildung 12.

⁴ Siehe Kapitel F4 „Sonderfälle“

⁵ Siehe Kapitel G2 „Ebener Spalt“

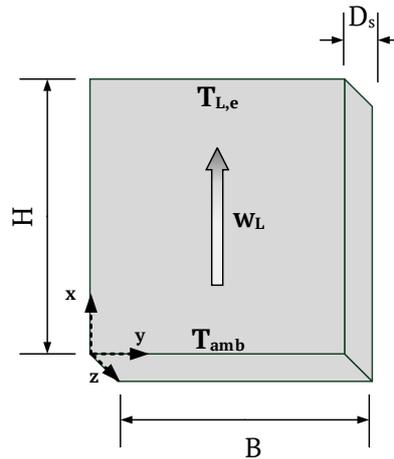


Abbildung 12: Schema des Luftkanals der aLT

Durch Zerlegung des Kanals in n -Teilstücke in x -Richtung kann der Wärmeübergang für jedes Teilstück dargestellt und berechnet werden, siehe Abbildung 13. Dabei kann die Luftgeschwindigkeit über den Spalt bei geeigneter Konstruktion als konstant angenommen werden.

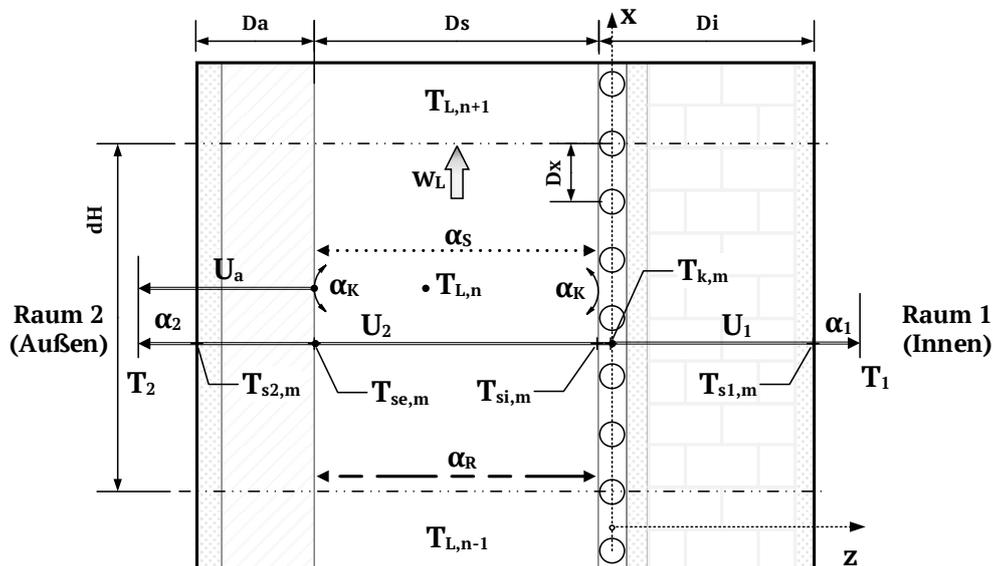


Abbildung 13: Übertragung des Modells aus Abbildung 5 auf die aLT; in Anlehnung an Luther (2013)

Mit:

- D_x Rohrabstand in x -Richtung [m]
- D_i Abstand der Rohrebene von der Innen-Oberfläche (Raum 1) [m]
- D_a Abstand der Spalt-Oberfläche von Raum 2 (Außen) [m]
- D_s Dicke des Luftspalts [m]
- $T_{1,2}$ Temperatur der angrenzenden Räume [°C]
- T_3 Oberflächentemperatur der Rohre in der Temperierungsebene [°C]
- $T_{s1,2,m}$ Mittlere Oberflächentemp. der beiden Grenzflächen (Raum 1/Raum 2) [°C]
- $T_{si,e,m}$ Mittlere Oberflächentemp. der beiden Spalt-Oberflächen (Innen/Außen) [°C]
- $T_{L,X}$ Mittlere Lufttemperatur im Luftspalt [°C]
- $\alpha_{1,2}$ Wärmeübergangskoeffizient von der Oberfläche in den Raum [W/(m²K)]
- α_K Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient im Luftspalt [W/(m²K)]
- α_S Radiativer Wärmeübergangskoeffizient im Luftspalt [W/(m²K)]
- α_R Wärmeübergangskoeffizient durch Randeffekte / Wärmebrücken [W/(m²K)]
- $U_{1,2}$ Wärmedurchgangskoeffizient von der Rohrebene in die Räume [W/(m²K)]
- w_L Mittlere Luftgeschwindigkeit im Luftspalt [m/s]

Ruhezustand der aLT

Der Ruhezustand bezogen auf die aLT bedeutet, dass keine Luft durch den Luftspalt strömt, unabhängig davon, ob es sich um natürliche Konvektion oder erzwungene Konvektion handelt. Gleichzeitig kann die aWT in Betrieb sein. In diesem Fall gelten die Berechnungsschritte aus Kapitel I4.1 vollumfänglich. Der Wandaufbau enthält eine stehende Luftschicht als eine Art zusätzliche Wärmedämmung, siehe DIN EN ISO 6946 (2018). Dementsprechend erhöht sich der Widerstand R_2 und somit auch der Wirkungsgrad der aWT, entsprechend Gleichung (22).

Betriebsmodi der aLT

Der Betrieb der aLT wird durch einen Luftstrom durch den Spalt definiert. Bezüglich der Temperaturen und der Wärmeströme können auch hier die Berechnungsschritte aus Kapitel I4.1 übernommen werden. Also kann auch die aLT im teilkompensatorischen, kompensatorischen und überkompensatorischen Bereich betrieben werden. Durch den Luftspalt und den Wärmeübergang an die Luft verändern sich jedoch die Wärmeströme innerhalb des Bauteils, siehe Abbildung 14. Für den stationären Fall und den Annahmen entsprechend Kapitel I4.1⁶ lassen sich die folgenden Zusammenhänge aufstellen:

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_L \quad (27)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{L,i} + \dot{Q}_{L,e} \quad (28)$$

$$\dot{Q}_1 = \frac{(T_k - T_1)}{R_1} \cdot A \quad (29)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{(T_{se,m} - T_2)}{R_2} \cdot A \text{ bzw. } \dot{Q}_2 = \dot{Q}_s + \dot{Q}_r - \dot{Q}_{L,e} \quad (30)$$

$$\dot{Q}_s = \alpha_s \cdot (T_{si,m} - T_{se,m}) \cdot A \quad (31)$$

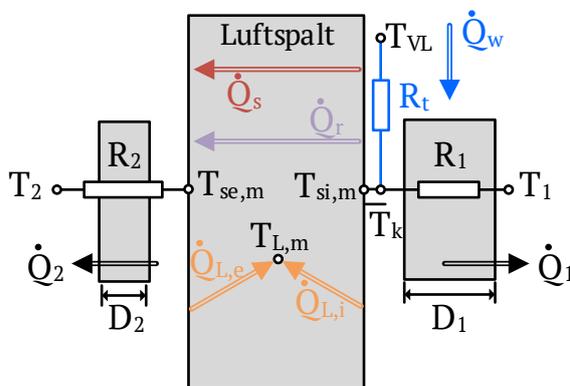


Abbildung 14: Erweiterung des Widerstandsnetzwerks aus Abbildung 6 um den Luftspalt

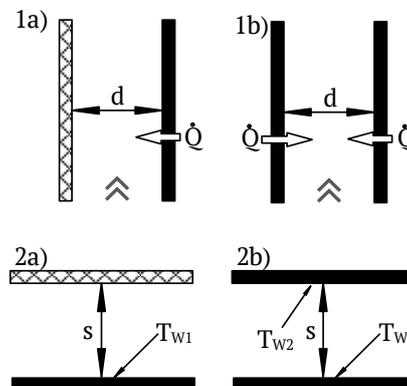


Abbildung 15: Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs im Luftspalt nach VDI (2013)

Dabei kann der Wärmestrom durch Strahlung innerhalb des Luftspalts entsprechend der Gleichungen für stationären Wärmeübergang durch Strahlung berechnet werden. Für den üblichen Temperaturbereich der aLT kann der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung α_s in der Größenordnung $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen werden, siehe Schmidt (2020). Die gleiche Größenordnung wurde auch in Hau (2010) und Luther (2013) ermittelt. Der Wärmestrom durch Randeffekte \dot{Q}_r kann als eine Art Wärmebrücke betrachtet und berechnet werden. Für eine überschlägige Abschätzung kann dieser Wärmestrom vernachlässigt werden.

⁶ Zusätzliche Annahme: $(T_{k,m})$ entspricht $(T_{si,m})$.

Für die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Luftspalt ist insbesondere die Betriebsweise der aLT relevant:

1) Freie Konvektion

Bei der freien (natürlichen) Konvektion strömt die Luft in beheizten Kanälen infolge von Auftriebskräften durch Dichteunterschiede (Schachtwirkung) vom Kanaleintritt zum – austritt. Entsprechend VDI (2013) wird unterschieden zwischen einem einseitig beheizten Kanal (1a) und einem zweiseitig beheizten Kanal (1b), siehe Abbildung 15. Beide Ansätze bilden die aLT nicht ideal ab, können jedoch als eine Art Min/Max-Bedingung genutzt werden. Die Berechnung des entsprechenden (konvektiven) Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt nach VDI (2013) über die Nusselt-Zahl, als Funktion der Rayleigh-Zahl für senkrechte Kanäle Ra_s^* .

$$Nu_{SE} = \frac{\alpha_{k,f} \cdot l}{\lambda} \quad \& \quad Nu_{SE} = F(Ra_s^*) \quad (32)$$

$$Ra_s^* = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{si,m} - T_{L,ein}) \cdot l^3}{\nu \cdot a} \cdot \frac{l}{H} \quad (33)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad [] \quad (34)$$

Mit:

- $\alpha_{k,f}$ Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient im Luftspalt [W/(m²K)]
- g Erdbeschleunigung 9.81 [m/s²]
- β Ausdehnungskoeffizient = $1/T_\infty$ [K⁻¹]
- l Überströmlänge (bei 1a) $l = d$, bei 1b) $l = 2d$ [m]
- H Höhe des Kanals [m]
- ν Kinematische Viskosität, berechnet bei $(T_{si,m} + T_{L,ein}) \cdot 0.5$ [m²/s]
- a Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

Setzt man die Auslegungsbedingungen der aLT in die Gleichungen (32) bis (34) ein ($T_{si,max} = 35^\circ\text{C}$, $T_{L,ein,min} = -12^\circ\text{C}$, $h = 2.85$ m, $d = 0.02$ m), so ergibt sich für Fall 1a) α_K zu rund 3.2 W/(m²K) und für den Fall 1b) ergibt sich $\alpha_{K,f}$ zu rund 3.6 W/(m²K). Entsprechend VDI (2013) läge $\alpha_{K,f}$ somit in der Größenordnung von rund 3-4 W/(m²K).

2) Erzwungene Konvektion

Bei der erzwungenen Konvektion im ebenen Spalt nach VDI (2013) wird ebenfalls unterschieden, ob der Spalt einseitig beheizt ist (2a)) oder beidseitig beheizt ist (2b)). Bei der Berechnung des Wärmeübergangs muss berücksichtigt werden, ob die Luftströmung laminar oder turbulent ist. Die folgenden Annahmen gelten für eine laminare Strömung zwischen den beiden Platten des Luftspalts. Generell gilt:

$$Nu_{ES} = \frac{\alpha_{k,e} \cdot d_h}{\lambda} \quad (35)$$

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} \quad (36)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (37)$$

Mit:

- $\alpha_{k,e}$ Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient im Luftspalt [W/(m²K)]
- d_h Hydraulischer Durchmesser ($d_h = 2 \cdot D_s$) [m]
- ν Kinematische Viskosität, berechnet bei $(T_{si,m} + T_{L,ein}) \cdot 0.5$ [m²/s]
- a Temperaturleitfähigkeit [m²/s]
- λ Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
- w Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt [m/s]

Für den Fall „Einseitige Beheizung“ 2a) wird Nu_{ES} laut VDI (2013) folgendermaßen berechnet:

$$Nu_{ES} = 4.86 + \frac{0.061 \cdot \{Re \cdot Pr \cdot d_h/l\}^{1.2}}{1 + 0.091 \cdot \{Re \cdot Pr \cdot d_h/l\}^{0.17}} \quad (38)$$

Für den Fall „Beidseitige Beheizung“ 2b) wird Nu_{ES} laut VDI (2013) folgendermaßen berechnet:

$$Nu_{ES} = 7.55 + \frac{0.024 \cdot \{Re \cdot Pr \cdot d_h/l\}^{1.14}}{1 + 0.0358 \cdot \{Re \cdot Pr \cdot d_h/l\}^{0.64} \cdot Pr^{0.17}} \quad (39)$$

Bei turbulenter Strömung können die Berechnungsschritte VDI (2013) entnommen werden. Setzt man die Auslegungsbedingungen der aLT in die Gleichungen (35) bis (37) ein ($T_{si,max} = 35^\circ\text{C}$, $T_{L,ein,min} = -12^\circ\text{C}$, $l = 2.85 \text{ m}$, $s = 0.02 \text{ m}$), so ergibt sich für Fall 1a) ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient α_K von rund $3.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $3.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für den Fall 1b) ergibt sich α_K zu $4.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $5.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Bandbreite resultiert aus der Bandbreite der Luftgeschwindigkeit. Hier wurden minimal 0.15 m/s angenommen und maximal 0.45 m/s . Dies entspricht den typischen Betriebsbedingungen an der Laborwand, und der Feldtestfläche. Auch bei erzwungener Konvektion stellt sich eine Mischkonvention im Luftspalt ein, da die natürliche Konvektion von der erzwungenen Konvektion überlagert wird. Mit der Näherung für Mischkonvektion wird für die Randbedingungen ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von $5.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ermittelt. Diese Näherung gilt jedoch für ebene Platten und nicht für den Luftspalt. Interessant ist, dass die Größenordnung der Näherung stimmt. In Abbildung 16 ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient für den Fall 2a) über die wirksame Länge des Luftspalts aufgetragen. Zu erkennen ist, dass ab Längen $> 1 \text{ m}$ ein nahezu horizontaler Verlauf für α_K auftritt und somit mit nahezu konstanten Werten gerechnet werden kann.

Entsprechend VDI (2013) läge der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, je nach Luftgeschwindigkeit im Spalt und angesetztem Modell (2a) oder 2b)), bei Auslegungsbedingungen und erzwungener Konvektion im Luftspalt der aLT somit in der Größenordnung von minimal $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und maximal $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

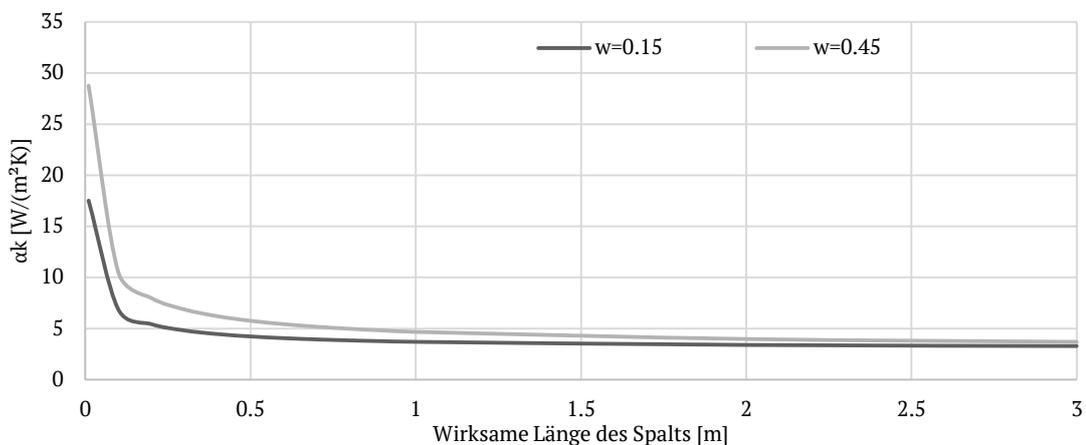


Abbildung 16: Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion ($\alpha_{k,e}$) über die Länge des Luftspalts für verschiedene Luftgeschwindigkeiten im Luftspalt für den Fall 2a)

1.1.1.1 Kennwerte des aLT-Modells

Ausnutzungsfaktor bzw. Wirkungsgrad der aLT

Der stat. Wirkungsgrad der aWT entsprechend Gleichung (22) wird für die aLT erweitert zu:

$$\eta_{aLT} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_0 + \dot{Q}_L}{\dot{Q}_w} \cdot 100 [\%] \quad (40)$$

Im Ruhezustand kann auch Gleichung (23) verwendet werden.

Aufteilungsfaktor der aLT

Der Aufteilungsfaktor der aLT ergibt sich als Erweiterung von Gleichung (24) zu:

$$f_{split,aLT} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_L}{\dot{Q}_w} \cdot 100 [\%] \quad (41)$$

Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad η_s entsprechend Luther (2013) beschreibt den Anteil der Strahlungs- und Randwärme, der für die Aufwärmung des Luftstroms nutzbar gemacht werden kann.

$$\eta_{s,aLT} = \frac{\alpha_k}{(\alpha_k + U_2)} \cdot 100 [\%] \quad (42)$$

Mit:

- α_k Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient im Luftspalt [W/(m²K)]
- U_2 Wärmedurchgangskoeffizient von Luftspalt nach außen [W/(m²K)]

Übergangsverhältnis

Mit Hilfe des Übergangsverhältnisses \ddot{U}_{aLT} kann die äußere Oberflächentemperatur des Luftkanals T_{se} mittels des Superpositionsprinzips berechnet werden, siehe Luther (2013).

$$\ddot{U}_{aLT} = \frac{\eta_{aLT} \cdot (\alpha_s + \alpha_r)}{\alpha_k} \cdot 100 [\%] \quad (43)$$

Mit den Kennwerten aus Gleichung (42) und (43) kann der Temperaturverlauf im Luftspalt für T_{se} und T_L beispielhaft dargestellt werden. Ein beispielhafter Verlauf für die folgenden Annahmen ist in Abbildung 17 dargestellt:

$$\begin{array}{llllll} \alpha_k = 4.0 \text{ W/(m}^2\text{K)} & \alpha_r = 0 \text{ W/(m}^2\text{K)} & d_i = 0.02 \text{ m} & T_a = -12^\circ\text{C} & d\tau = 0.1 \text{ s} \\ \alpha_s = 5.1 \text{ W/(m}^2\text{K)} & U_a = 0.29 \text{ W/(m}^2\text{K)} & T_{si} = 35^\circ\text{C} & w = 0.25 \text{ m/s} & dH = 0.025 \text{ m} \end{array}$$

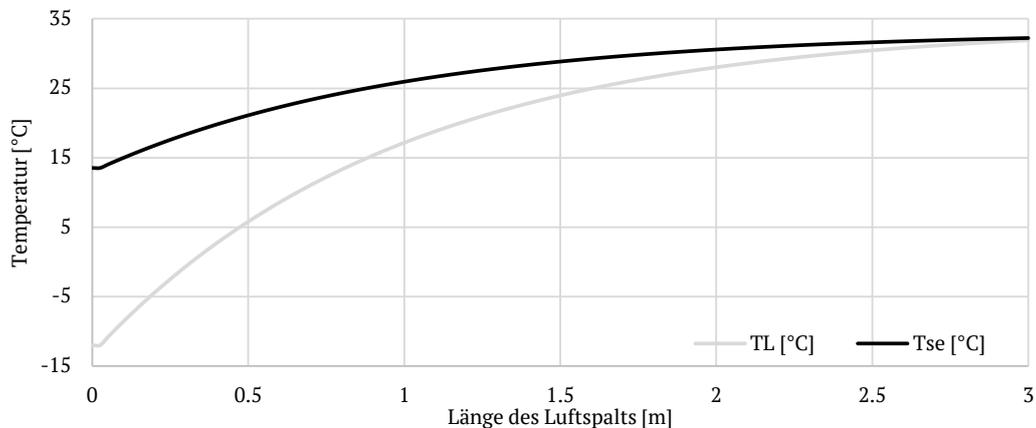


Abbildung 17: Lufttemperatur T_L und äußere Oberflächentemperatur T_{se} über die Länge des Luftspalts

Weitere Informationen und Abschätzungen zur aLT können dem Bericht von Dr. Gerhard Luther entnommen werden, siehe Anhang. Des Weiteren wurde eine Laborwand der aLT errichtet und eine Vielzahl von Messungen durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse können dem entsprechenden Bericht im Anhang entnommen werden.

1.2 Umsetzung Demonstrationsgebäude bzw. der Feldtestfassade

1.2.1 Ausstattung der Feldtestfassade mit aWT & aLT

Die Ausstattung der Feldtestfassade mit aWT und aLT wurde in komprimierter Form auch in Schmidt et al. (2018) veröffentlicht. Zusätzlich gab es auch eine Veröffentlichung des BINE Informationsdienstes, siehe BINE (2015). Eine ausführliche Darstellung der Feldtestfassade und der Ausstattung mit aWT & aLT kann Schmidt (2019) im Anhang entnommen werden.

1.2.1.1 Konzeption

Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Vorprojekt, sieht Altgeld et al. (2010) und dem laufenden Projekt wurde folgendes Konzept für die aWT gewählt:

- **Rohrsystem (thermisch aktive Schicht):** Für Kapillarrohrmatten wurde in dem Vorprojekt das beste Preis/Leistungs-Verhältnis ermittelt. Beim Vergleich verschiedener Rohrsysteme wurde die Wärmeabgabe und Wärmeverteilung in Relation zu den Materialkosten bestimmt.
- **Putzschicht:** Entsprechend der Resultate des Vorprojektes wurde sich für eingeputzte Kapillarrohrmatten entschieden. Diese bewirken eine gute thermische Anbindung an die Bestandswand und eine homogene Wärmeverteilung nach innen.
- **WDVS:** Es wurde der Einsatz eines vollflächig verklebten WDVS und den Einsatz der Kapillarrohrmatten festgelegt. Auf eine Verdübelung sollte im Kontext der Fehleranfälligkeit (Beschädigung des Rohrsystems) und des Planungsaufwandes im Zusammenhang mit einer thermischen Aktivierung verzichtet werden.
- **Belegung:** Die Belegungsplanung in Abbildung 18 beruht auf einer möglichst vollflächigen Belegung und der Realisierung von zwei Feldtestflächen (für aWT & aLT). Die Feldtestfläche für die aLT im 1.OG (links) ist grün umrandet dargestellt, die Feldtestfläche für die aWT im 2.OG (links) gelb umrandet. Die beiden Feldtestflächen erhielten eigene Heizkreise, die direkt mit der Technikzentrale verbunden sind. Somit ergaben sich in der Konzeptionsphase insgesamt acht Heizkreise.

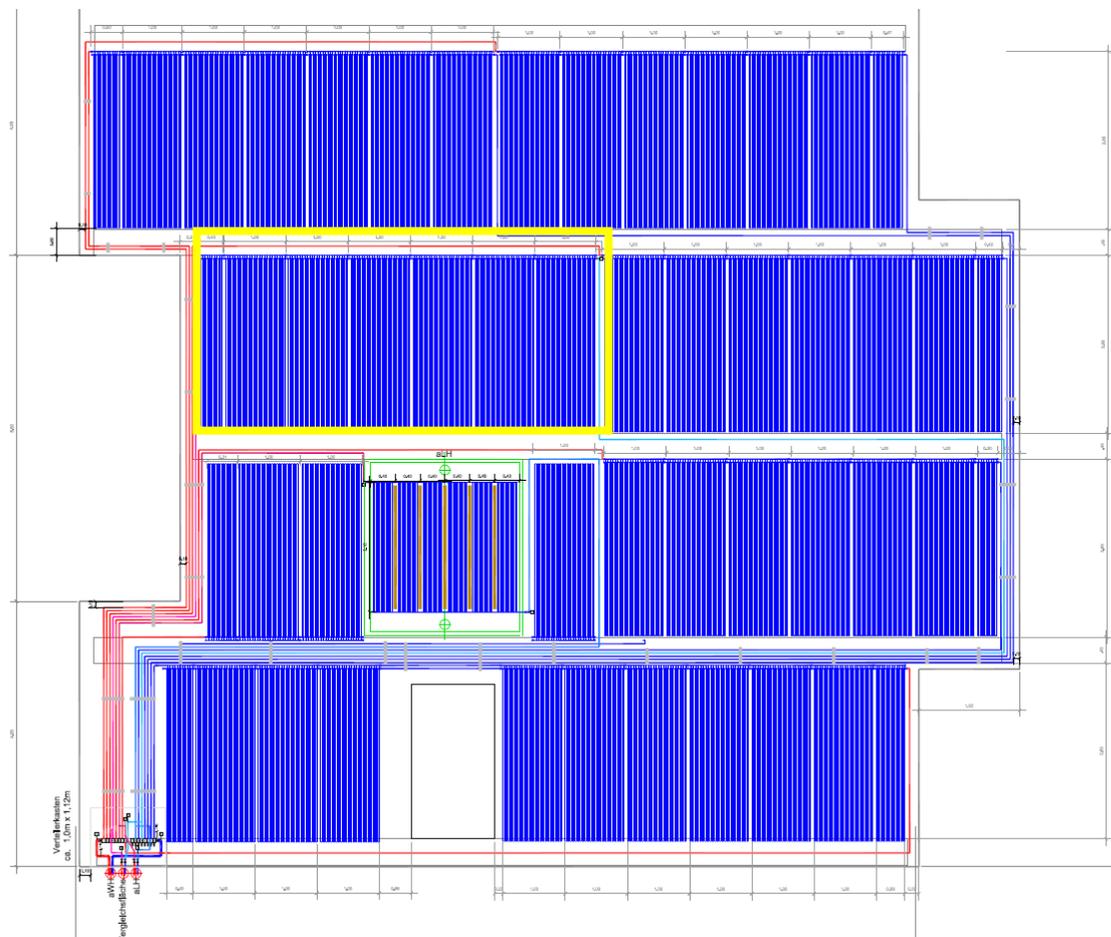
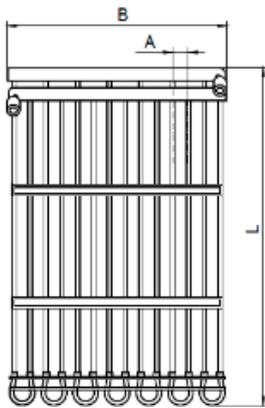


Abbildung 18: Umgesetzte Belegungsplanung der Fassade; Unterlagen der GEFGA Energiesysteme GmbH

1.2.1.2 Auslegung

Für die Fassade wurden passend gefertigte Kapillarrohrmatten eingesetzt. Hier wurde insbesondere die Länge der Matten an die lichte Höhe der Räume angepasst. Von den Matten entsprechend Abbildung 19 wurden insgesamt 45 Stück an der Fassade verbaut. Sofern möglich wurden die Matten so platziert, dass die Stammrohre oben liegen, siehe Belegungsplanung in Abbildung 18.



Technische Daten Kapillarrohrmatte „SB20“	
Stammrohr	20x2 mm
Kapillarrohr	4,3x0,8 mm
Abstand A	20 mm
Länge L	2850 mm
Breite B	1000 mm
Spez. Masse	ca. 430 g/m ² Kapillarrohrfläche
Spez. Wasserinhalt	0,320 l/m ² Kapillarrohrfläche
Spez. Gesamtmasse	Ca. 750 g/m ² Kapillarrohrfläche
Material	Polypropylen ($\lambda = 0.21 \text{ W}/(\text{mK})$)

Abbildung 19: Schema der eingesetzten Kapillarrohrmatten und technische Details, siehe Clina (2013)

Die Gesamtfläche der Fassade beträgt rund 192 m². Davon wurden rund 135 m² direkt durch die Kapillarrohrmatten thermisch aktiviert. Da insgesamt neben den 45 Matten auch ca. 275 m der Stammrohre auf der Fassade verlegt wurden, werden weitere rund 5 m² indirekt durch die Stammrohre thermisch aktiviert. Somit liegt die thermisch aktivierte Fläche, je nach Betrachtungsweise, zwischen 135 m² und 140 m². Der Belegungsgrad der Fassade beträgt damit rund 73%. In Abbildung 20 (links) ist die Wärmeabgabe der aktiven Schicht über die mittlere Temperatur der aWT für verschiedene Umgebungstemperaturen aufgetragen. Die Wärmeabgabe beinhaltet den Wärmestrom nach innen und den Wärmestrom nach außen über die Dämmung (Verluste). Ausgelegt wurde die Wandtemperierung auf eine mittlere Temperatur von 30°C, was einer maximalen Wärmeabgabe von rund 40 W/m² entspricht, vergleiche Abbildung 20 (links). Beide Grafiken in Abbildung 20 wurden für den umgesetzten Wandaufbau der Feldtestfassade erstellt, jedoch mit einem unvalidierten Simulationsmodell (HEAT2). Bei einer aktiven Fläche von ca. 140 m² entspricht dies einer thermischen Gesamtleistung von rund 5,6 kW_{th}. Auf diese Leistung wurden das Versorgungssystem und der Wärmeerzeuger der Wandtemperierung ausgelegt.

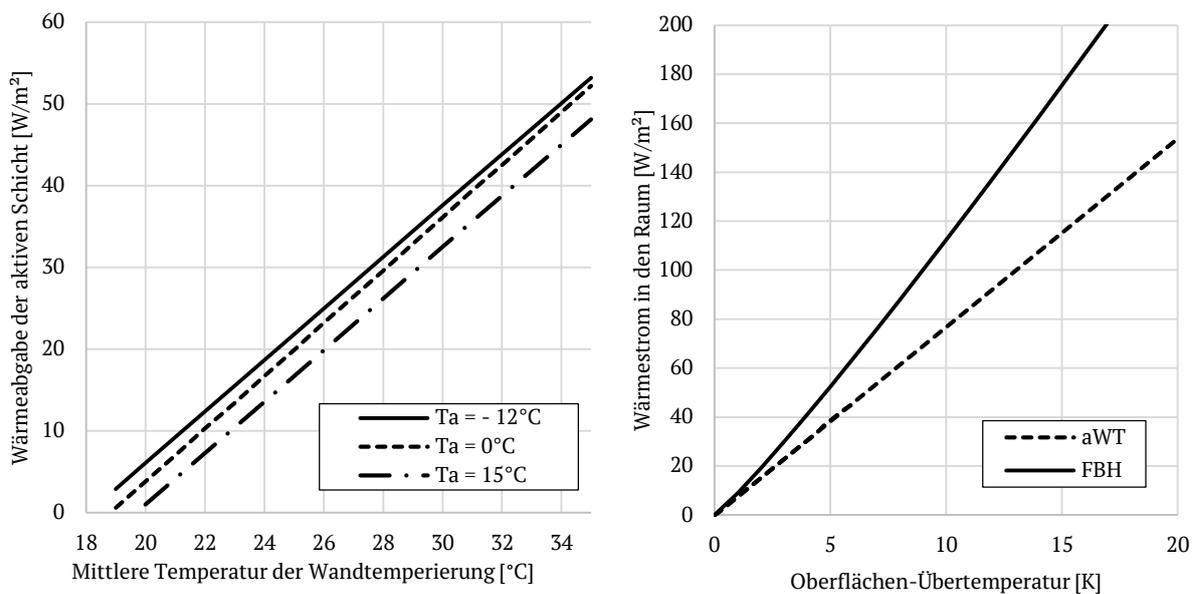


Abbildung 20: Stationäre Wärmeabgabe der aWT über deren (arithmetische) mittlere Temperatur für verschiedene Umgebungstemperaturen (T_a), bei $T_i = 20^\circ\text{C}$ (links) und Vergleich der Basiskennlinie von aWT ($T_i = 20^\circ\text{C}$ und $T_a = 0^\circ\text{C}$) und Fußbodenheizung (rechts)

1.2.1.3 Aufbau und Anbringung

Die Arbeitsschritte für die Montage und Befestigung der Kapillarrohrmatten unterscheiden sich nicht von einer Standard-Montage im Innenraum (Wand- oder Deckenheizung). Nachfolgend eine Übersicht der Arbeitsschritte und Montagemittel, siehe Abbildung 21.

Montage der Matten

Für die Befestigung der Stammrohre und Matten auf der Fassade gibt es drei mögliche Befestigungsmöglichkeiten. Alle drei Befestigungsmittel werden für unterschiedliche Zwecke bzw. an verschiedenen Stellen eingesetzt. Die Lage der einzelnen Befestigungsmittel wird vom Planer im Rahmen der detaillierten Belegungsplanung grob festgelegt.

- A) Clipschiene (Krumrey-Schiene): Die Clipschiene wird verwendet um mehrere Stammrohre parallel zu befestigen. Entsprechend dem Namen können die Stammrohre in die Clipschiene „eingeclipst“ werden.
- B) Dübelhaken (Kunststoffhaken): Die Dübelhaken werden zur Fixierung einzelner Stammrohre bzw. der Matten-Stammrohre verwendet. Die Dübelhaken fixieren die Stammrohre direkt auf der Fassade.
- C) Dübelnagel (Kunststoffnagel): Die Kunststoffnägel werden zur Fixierung der Kapillare auf der Fassade verwendet. Diese verhindern, dass sich die Matten beim maschinellen Einputzen von der Fassade wegdrücken.

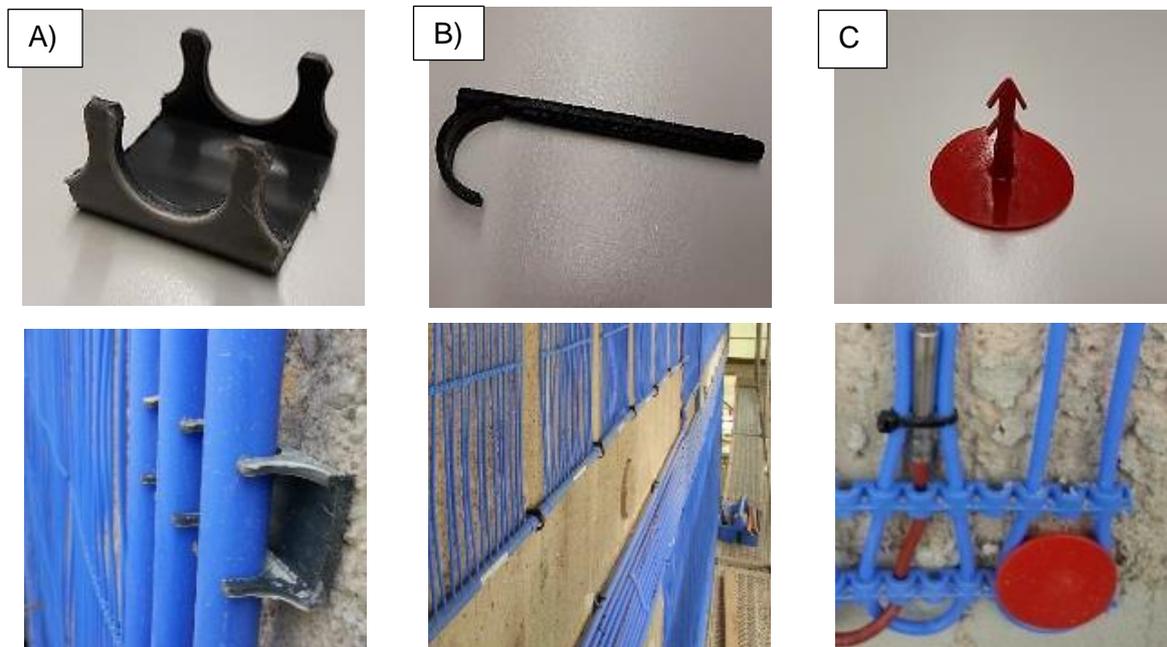


Abbildung 21: Befestigungsmittel für die Kapillarrohrmatten und Stammrohre auf der Fassade: A) Clipschiene, B) Dübelhaken und C) Kunststoffnagel (siehe auch Clina (2013))

Die Stammrohre und Fittings aus Polypropylen (PP) werden untereinander mit dem Muffenschweißverfahren verschweißt. Hierbei werden das Fitting und die Rohrleitung gleichzeitig angewärmt und die beiden Teile werden anschließend gleichzeitig von den Schweißeinsätzen gezogen und zügig und ohne Verdrehen ineinander geschoben. Nach einer definierten Haltezeit von 10 – 60 Sekunden sind die beiden Teile fest miteinander verbunden und nach 30 Minuten sind die Schweißverbindungen voll belastbar. Nach der Montage der Matten wurde eine erste Dichtheitsprobe über eine Stunde mit Druckluft (hier 6 bar) durchgeführt. Möglicherweise vorhandene Undichtigkeiten können dabei z.B. durch ein Pfeifgeräusch aufgefunden werden. Nach erfolgreicher Dichtheitsprobe wurde das System mit Fluid befüllt und entlüftet.

Einputzen der Matten

Nach der Montage der Matten und Stammrohre auf der Fassade und der anschließenden Druckprobe und Befüllung wurden die Kapillarrohrmatten mit ca. 10 mm gut wärmeleitendem

Klebemörtel eingeputzt. Dies soll zu einer guten und homogenen Wärmeverteilung in der Temperierungsebene führen. Der Unterputz musste 10 Tage trocknen, bevor die nächste Schicht aufgebracht werden konnte.



Abbildung 22: Maschinelles Aufbringen des Unterputzes auf die Kapillarrohrmatten (links) und manuelles Glattstreichen der Putzschicht (Mitte und rechts)

Überputzen der Matten

Das Überputzen der Matten ist notwendig um eine ebene Klebefläche für das Aufkleben des WDVS zu gewährleisten. Für das Überputzen der Matten war von Anfang an ein Kalk-Zement-Leichtunterputz vorgesehen. Wichtig ist, dass der Unterputz zum Einsatz mit dem Unterputz für das Einputzen der Kapillarrohrmatten zugelassen ist. Andererseits musste der eingesetzte Unterputz wiederum als Grundlage für ein geklebtes WDVS zugelassen sein. Zuletzt sollte der Putz auch maschinell, einlagig in der benötigten Stärke aufgebracht werden können. Eingeplant war anfangs eine Gesamt-Schichtdicke für das Ein- und Überputzen von 30 mm. Im Rahmen der Bauausführung stellte sich jedoch einerseits heraus, dass die Fassade eine deutliche Unebenheit aufwies und diese teilweise ausgeglichen werden musste. Andererseits werden die Temperaturen in dem Fluid-Kreislauf der Kapillarrohrmatten an mehreren Stellen der Feldtestflächen der aWT und aLT gemessen. Hierfür wurden Tauchhülsen mit Temperaturfühler eingesetzt. Für das Einschrauben der Tauchhülsen werden sogenannte Einschweißsättel benötigt, mit einem Außendurchmesser von rund 40 mm, siehe Abbildung 23.



Abbildung 23: Maschinelles Überputzen der Kapillarrohrmatten (links), Ansicht der glattgestrichenen Fassade nach dem Überputzen (Mitte) und Foto der Einschweißsättel mit Tauchhülsen für die Temperatursensoren an der Feldtestfläche als „dickstes Bauteil“ der Temperierungsebene

Nur durch die Herstellung einer ebenen Klebefläche wurde eine Gewährleistung vom ausführenden Betrieb für den Fassadenaufbau übernommen. Daher wurde der Schichtaufbau so ausgeführt, dass die Einschweißsättel als dickstes Bauteil gerade so überdeckt waren. Hierfür mussten ca. 40 mm Putz im Zuge des Überputzens aufgebracht werden. Damit handelt es sich um ein Dickputzsystem mit entsprechend längerer Trocknungsdauer. Im Endeffekt lag die Trocknungszeit des Putzes, auch aufgrund der Witterung, bei 54 Tagen. Nach der

Trocknung des Putzes wurde die Fläche entsprechend der Aufheizempfehlung des Herstellers kontrolliert aufgeheizt. Diese Empfehlung gilt für innenliegende Wand- und Deckenheizungen, wurde hier jedoch auf das außenliegende System übertragen. Hierfür kam ein mobiles Heizgerät zum Einsatz, das direkt an den Verteiler angeschlossen wurde.

Wärmedämmschicht

Nach Trocknung der Putzschicht wurde zur Umgebung hin das WDVS aufgebracht. Da es sich durch die vorhergehende Betonsanierung um eine neuwertige Oberfläche handelte, konnte ein vollflächig verklebtes WDVS, ohne zusätzliche Dübelung, zum Einsatz kommen. Dementsprechend wurde Polystyrol als Material für die Wärmedämmschicht gewählt. Aufgebracht wurden EPS-Platten der Wärmeleitgruppe 032 mit einer Stärke von 160 mm. Abschließend wurden die Armierung und der Oberputz ausgeführt. Die fertige Fassade ist in Abbildung 25 zu erkennen.

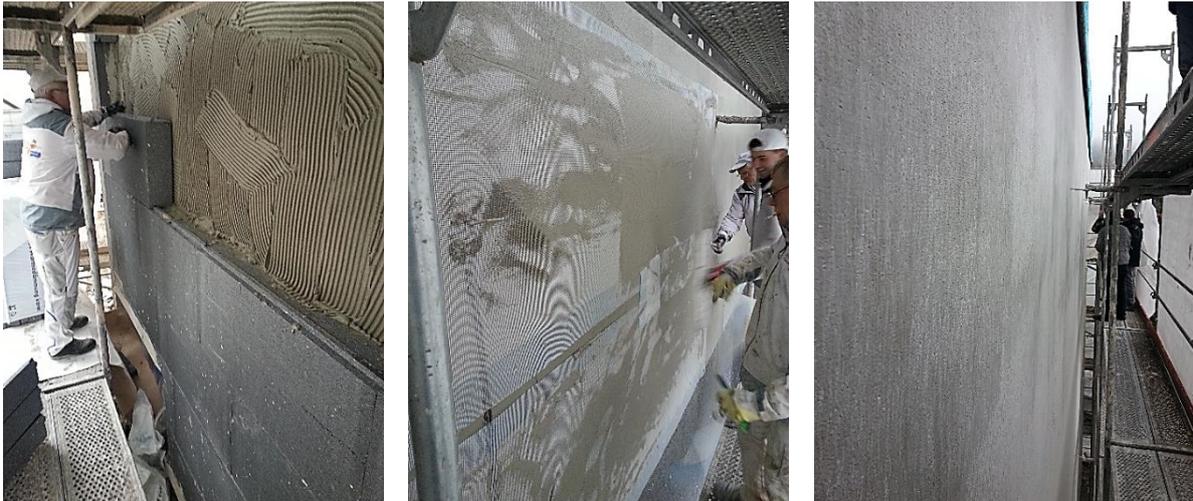


Abbildung 24: Installation der Wärmedämmplatten aus EPS auf der Fassade (links), Aufputzen des Armierungsgewebes (Mitte) und Blick auf die Fassade nach der Armierung, noch ohne Oberputz (rechts)



Abbildung 25: Fotos der Fassade nach Abschluss der Sanierungsarbeiten (in der Mitte der Fassade über der Tür ist die Außenklappe der aLT-Feldtestfläche zu erkennen)

1.2.1.4 Resultierender Schichtaufbau

Der resultierende Schichtaufbau der Feldtestfassade der aWT ist in Abbildung 26 dargestellt und kann auch Tabelle 9 entnommen werden.

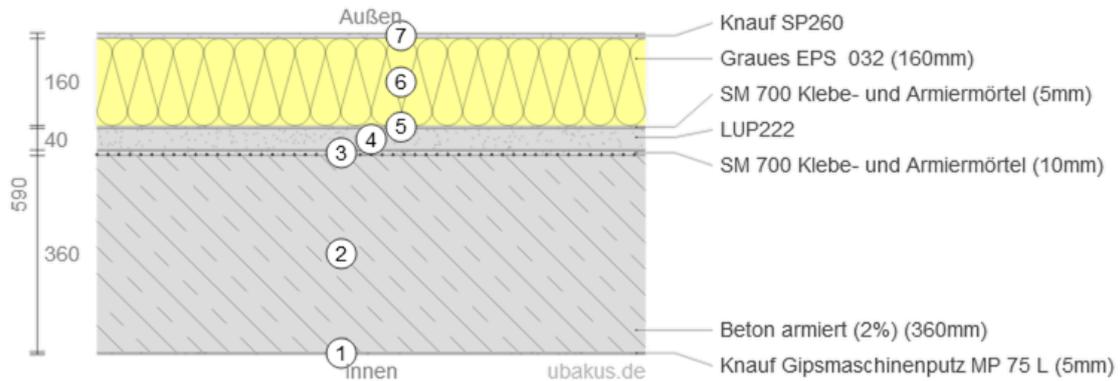


Abbildung 26: Resultierender Schichtaufbau für die Feldtestfassade, Zeichnung erzeugt mit ubakus.de

Tabelle 9: Schichtaufbau der Feldtestfläche, entsprechend Abbildung 26

Nr.	Name / Bezeichnung	Dicke [mm]	Material
1	Gips-Leichtputz	10	Gipsputz MP75L
2	Bestandswand	360	Bewehrter Stahl-Beton
3	Klebemörtel mit aWT	10	Klebemörtel SM300
4	Kalk-Zement-Putz	40	Leichtputz LUP222
5	Klebemörtel	5	Klebemörtel SM700
6	Wärmedämmung	160	EPS WLG 032
7	Armierung/Oberputz	10	Oberputz SP260
Gesamter Wandaufbau		≈ 595 ⁷	

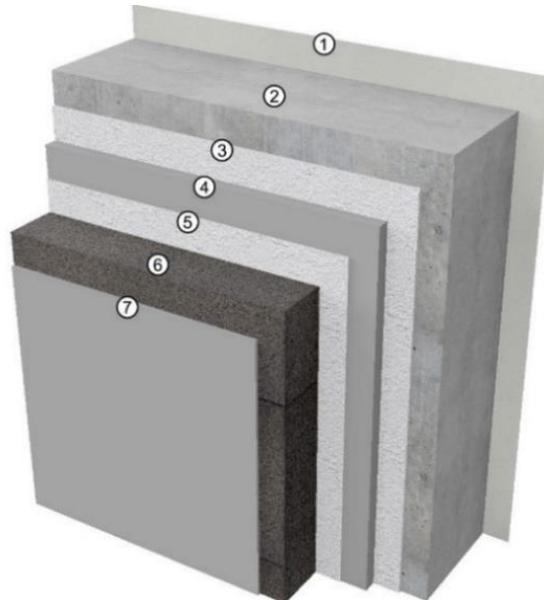


Abbildung 27: 3D-Skizze des Wandaufbaus der aWT-Feldtestfläche, erzeugt mit ubakus.de

Durch das Aufbringen des WDVS erreicht die Außenwand einen U-Wert von rund 0,18 W/m²K. Der Wirkungsgrad der aWT entsprechend Kapitel I4.1 für den umgesetzten Schichtaufbau beträgt ca. 94 %.

⁷ Bei allen aufgeführten Werten handelt es sich um ungefähre Angaben, die entsprechend der Genauigkeit der Bauausführung um +/- 5 mm abweichen können.

1.2.1.5 Systemkosten der Feldtestfassade

Unter Systemkosten werden nur die Zusatzkosten für die aWT verstanden, also die Mehrkosten für Material und Arbeit an der Wandtemperierung, im Vergleich zu einer Standard-Sanierung einer Fassade mit WDVS. Alle anderen Kosten werden als Sowieso-Kosten nicht in die Systemkostenermittlung integriert.

Bei der aWT-Feldtestfläche handelt es sich um einen Prototyp mit diversen feldtestspezifischen Besonderheiten. So wurden zwar die Systemkosten für den Feldtest berechnet, diese sind jedoch nicht repräsentativ für das Standard-System der aWT. Daher wurden im Folgenden noch standardisierte Systemkosten berechnet. Die folgenden Gründe führen zu erhöhten Systemkosten im Feldtest im Vergleich zu einer Standard-Umsetzung der aWT:

- Sehr dicker Schichtaufbau durch die verbaute Messtechnik und aus Gewährleistungsgründen (neues System).
- Vor Ort war kein geeigneter (erfahrener) Fachbetrieb verfügbar. Dadurch entstanden Anreise- und Montagekosten, die nicht systembedingt sind und dementsprechend nachfolgend nicht erfasst werden.
- Aus Gewährleistungsgründen mussten mehr Befestigungspunkte für die Matten gesetzt werden als vorab eingeplant und vom Hersteller der Matten vorgesehen (erhöhte Material- und Arbeitskosten).
- Befüllung der Matten mit Glykol-Wasser-Gemisch statt Wasser (Sicherheitsaspekt).
- Jeder Raum wurde mit einem Heizkreis der aWT ausgestattet. Für den primären Einsatzfall der aWT (Grundtemperierung) ist jedoch auch eine möglichst einfache und großflächige Belegung der Fassade mit wenigen Heizkreisen ausreichend.

Um die Systemkosten von diesen „Besonderheiten“ zu bereinigen, wurden daher neben den Systemkosten „Feldtestfassade“ (Variante 0) noch zwei standardisierte bzw. optimierte Varianten, auf Grundlage der Erfahrungen vom Feldtest, erstellt (Variante 1 und Variante 2).

Randbedingungen und Betrachtungsgrenzen:

Bei den folgenden Kostenschätzungen bleiben die Kosten z.B. für das Baugerüst und das Einrichten der Baustelle unbetrachtet. Da das Aufbringen der aWT immer zusammen mit einem WDVS betrachtet wird, werden diese Arbeiten der Kostenstelle „Wärmedämmung“ o.ä. zugeordnet. Auch eine Vorbehandlung des Untergrunds o.ä. wird bei der Berechnung der Systemkosten nicht betrachtet. Auch die Anbindung des Verteilers an die vorhandene oder neue Heizungsanlage inkl. Armaturen und Zubehör wird nicht betrachtet. Die Systemgrenze für die Berechnung der Systemkosten liegt in dem Heizkreisverteiler. Alles was darüber hinaus Richtung Wärmezentrale benötigt wird, wird bei den Systemkosten nicht berücksichtigt, da diese Komponenten sehr gebäudespezifisch sind.

Bezugsfläche

In Abbildung 28 ist eine bemaßte Westansicht der Feldtestfassade dargestellt. Wie bereits oben beschrieben sind das 1.OG und das 2.OG gegenüber dem EG und dem 3.OG nach rechts verschoben (ca. 1.6 m). Somit handelt es sich bei der Feldtestfassade „netto“ um ein Rechteck mit einer Höhe von $\approx 14,2$ m und einer Breite von $\approx 13,5$ m. Es können zwei Bezugsflächen für die Ermittlung der Systemkosten herangezogen werden:

- 1) Gesamt-Fläche der Fassade: Die Gesamtfläche der Feldtestfassade beträgt rund 192 m^2 . Die Gesamtfläche beinhaltet jedoch auch die „Totflächen“ (Randflächen, Flächen zwischen den Matten, Tür, Sockel...). Die Maße können Abbildung 18 entnommen werden.

$$A_{ges,aWT} = H_{ges} \cdot B_{ges} = 14,2 \cdot 13,5 = 191,7 \text{ [m}^2\text{]} \quad (44)$$

- 2) Thermisch aktivierte Fläche der Fassade: Für die thermisch aktivierte Fläche wird die Fläche der verbauten Kapillarrohrmatten zusammengerechnet. Zusätzlich wird auch die Fläche, die mit Stammrohren belegt ist, hochgerechnet.

$$A_{spez,aWT} = A_{Matten} + A_{Stammrohre} = 134,8 + 5,5 = 140,3 \text{ [m}^2\text{]} \quad (45)$$

Tabelle 10: Berechnung der mit Matten belegten Fläche der Feldtestfassade

Komponente	Fläche/Matte [m ²]	Anzahl []	Fläche [m ²]
Matte 1 „aWH“	2.85	42	119.7
Matte 2 „Rand“	2.85	3.5	10.1
Matte 3 „aLH“	5.04	1	5.04
Summe A _{Matten} :			134.8

Tabelle 11: Berechnung der mit Stammrohren belegten Fläche der Feldtestfassade

Komponente	Fläche/Länge [m ² /m]	Länge [m]	Fläche [m ²]
Stammrohre	0.02	274.7	5.5
Summe A _{Stammrohre} :			5.5

Während die Gesamtfläche der Fassade rund 192 m² beträgt, ist die spezifische, thermisch aktivierte Fläche entsprechend der finalen Belegungsplanung (Abbildung 18) rund 140 m². Diese beiden Flächenangaben dienen nachfolgend als Grundlage der ermittelten, flächenspezifischen Kosten der Feldtestfassade. Dabei wird bei der thermisch aktivierten Fläche nur die Fläche berechnet, die direkt mit einer Matte oder einem Verteilrohr belegt ist, ohne Betrachtung der ebenfalls indirekt thermisch aktivierten umliegenden Randbereiche.

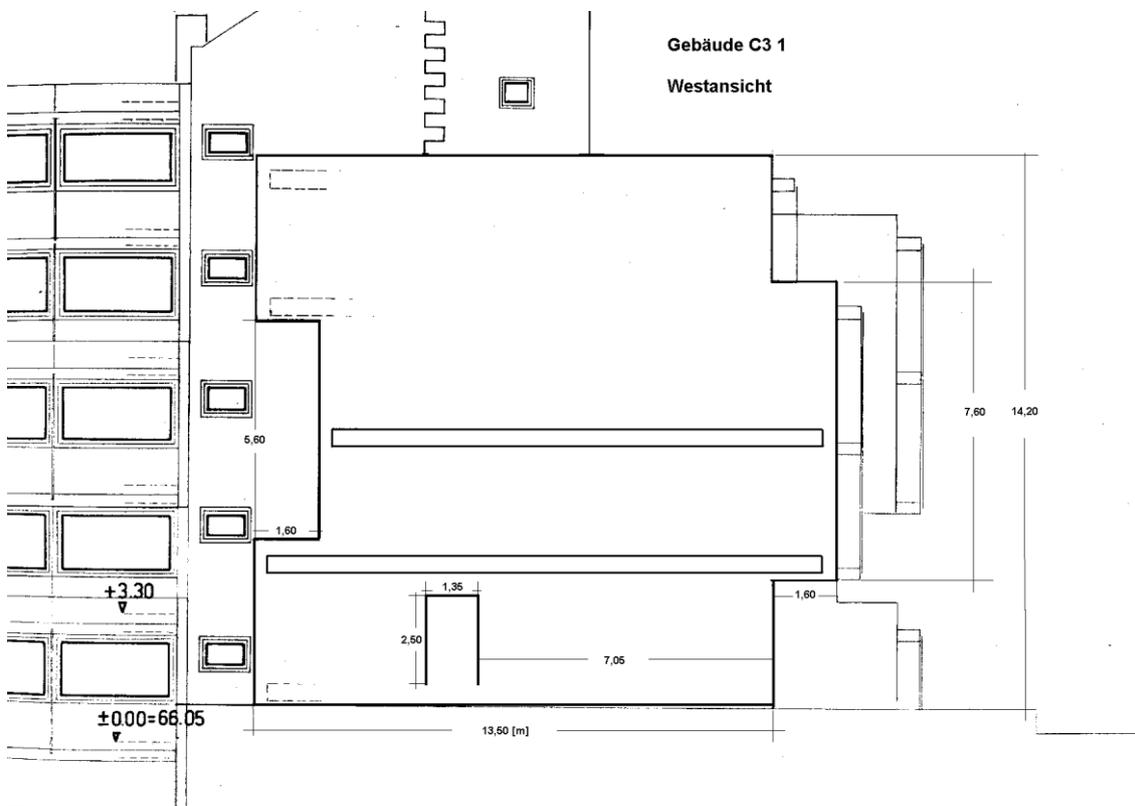


Abbildung 28: Westansicht der Feldtestfassade (Quelle: Gebäudeunterlagen der Universität des Saarlandes)

Der Belegungsgrad der umgesetzten Feldtestfassade liegt somit bei rund 73%. Bezogen auf die Mattenfläche liegt der Belegungsgrad bei rund 70% (134.8 m²/191.7 m²). Dieser hohe Belegungsgrad ist dadurch zu erklären, dass die Fassade außer der Tür im Erdgeschoss keine Öffnungen besitzt und somit nahezu vollflächig belegt werden kann. Die unbelegten „Totflächen“ entsprechen in erster Linie den Anschlüssen der Boden- und Deckenplatten und den Gebäudekanten. Bei den bisher in den Projekten betrachteten Gebäuden lag der mögliche Belegungsgrad, bezogen auf die Brutto-Fassadenfläche, eher im Bereich 60%, wegen Fenster- und Türöffnungen.

Überblick Belegungsvarianten

In Tabelle 12 bis Tabelle 17 sind die wesentlichen Kosten der drei Belegungsvarianten dargestellt. Zu erkennen ist, dass die flächenspezifischen Systemkosten von V0 zu V1 um ca. 12 €/m² abnehmen und von V1 zu V2 nochmal um 22 €/m² abgesenkt werden können. Die realistischen Systemkosten der aWT liegen somit bei 70 – 90 €/m² (netto).

Tabelle 12: Materialkostenzusammenstellung und Anlagentechnik für alle drei Varianten

Nr.	Name	Preis [€] V0	Preis [€] V1	Preis [€] V2
1	PP-Kapillarrohrmatten	5401	5310	5310
2	PP-Rohre + Formteile	789	364	364
3	Befestigungsmittel „Matten“	120	84	84
4	Heizkreisverteiler	290	201	201
5	Glykol für Befüllung	65	67	67
6	Klebemörtel + Leichtputz	2499	2047	803 ⁸
7	Kleinteile & Diverses	29	146	146
8	Stellantriebe für Verteiler	182	91	91
Summe (netto) :		9376	8310	7066

Tabelle 13: Montagekosten für die Belegungsvariante V0 „Feldtestfassade“

Nr.	Name	Anzahl	Einheit	Preis/Einheit [€]	Gesamtpreis [€]
1	Montage	107	Stunden	48.00	5163
2	Einputzen (~10 mm)	192	m ²	10.22	1961
3	Überputzen (~40 mm)	192	m ²	20.35	3907
Summe (netto) :					11004

Tabelle 14: Montagekosten für die Belegungsvariante „Standard-Belegung“

Nr.	Name	Anzahl	Einheit	Preis/Einheit [€]	Gesamtpreis [€]
1	Montage	80	Stunden	48.00	3840
2	Einputzen (~10 mm)	192	m ²	10.22	1959
3	Überputzen (~22 mm)	192	m ²	20.35	3901
Summe (netto) :					9700

Tabelle 15: Montagekosten für die Belegungsvariante „Ausklink-Lösung“

Nr.	Name	Anzahl	Einheit	Preis/Einheit [€]	Gesamtpreis [€]
1	Montage	80	Stunden	48.00	3840
2	Einputzen (~10 mm)	192	m ²	10.22	1959
3	Ausklinken	100	Lfm.	10.00	1000
Summe (netto) :					6799

Tabelle 16: Gesamtkosten für alle drei Belegungsvarianten

Nr.	Name	Preis [€] V0	Preis [€] V1	Preis [€] V2
1	Materialkosten und Anlagentechnik	9376	8310	7066
2	Montage- / Konstruktionskosten	11004	9700	6799
Summe (netto) :		20380	18010	13865

Tabelle 17: Berechnung der flächenspezifischen Systemkosten für alle drei Belegungsvarianten

Variante	V0		V1		V2	
Bezug	A _{ges,aWT}	A _{spez,aWT}	A _{ges,aWT}	A _{spez,aWT}	A _{ges,aWT}	A _{spez,aWT}
Fläche [m ²]	~192	~140	~192	~144	~192	~144
Gesamtkosten [netto]	20380	20380	18010	18010	13865	13865
Systemkosten [€/m ²]	~106	~140	~94	~124	~72	~96

⁸ Nur Klebemörtel

Details Variante 0: Feldtestfassade, Umsetzung

Hierbei handelt es sich um die umgesetzte Feldtestfassade, mit den oben beschriebenen Besonderheiten.

Details Variante 1: Feldtestfassade, Standardbelegung

Für eine Standardbelegung sollte die Fassade möglichst einfach und großflächig belegt werden. Jedes Geschoss erhält einen eigenen Heizkreis. Zudem wird keine (Fluid)Temperaturmessung direkt in der Fassadenfläche vorgesehen, dies führt zu einer Verringerung der Putzstärke.

Belegungsplanung Variante 1

Die überarbeitete Belegungsplanung „Standard“ ist in Abbildung 29 dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 18 ist zu erkennen, dass weniger Stammrohre benötigt werden, da sich die Anzahl der Heizkreise verringert hat. Zusätzlich wird so geplant, dass eine möglichst vollzählige Anzahl von Matten verbaut werden kann. Auch das Befestigungsmaterial wurde entsprechend den Erkenntnissen vom Feldtest optimiert. Dementsprechend werden für jede Matte sechs Kunststoffnägel und zwei Kunststoffhaken (Dübelhaken) benötigt. Mehrere parallele Stammrohre werden alle 1,5 m in einer Kunststoff-Clipschiene befestigt. Durch die geänderte Belegungsplanung ändern sich auch die Druckverlustberechnung, die Füllmenge (~100 l Glykol) und die thermisch aktive Fläche der Fassade.

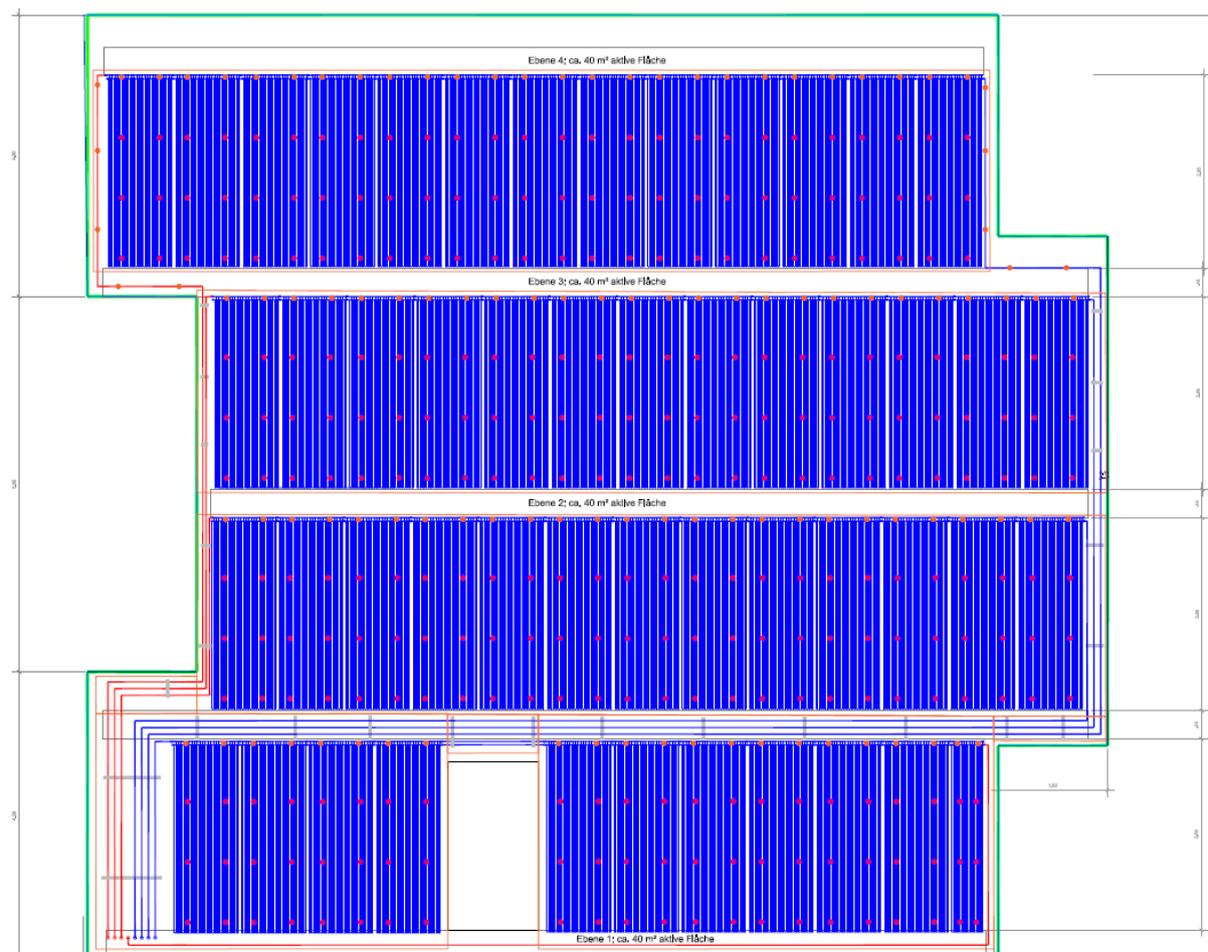


Abbildung 29: Belegungsplanung „Standard-Belegung der Feldtestfassade“ mit vier Heizkreisen und dem benötigten Befestigungsmaterial; Planungsunterlagen der GEFGA Energiesysteme GmbH

Thermisch aktivierte Fläche der Fassade

Für die thermisch aktivierte Fläche wird die Fläche der verbauten Kapillarrohrmatten addiert. Zusätzlich wird die Fläche, die mit Stammrohren belegt ist, hochgerechnet.

$$A_{\text{spez,aWT}} = A_{\text{Matten}} + A_{\text{Stammrohre}} = 141.1 + 4 \approx 145 \text{ [m}^2\text{]} \quad (46)$$

Tabelle 18: Berechnung der mit Matten belegten Fläche der Feldtestfassade

Komponente	Fläche/Matte [m ²]	Anzahl []	Fläche [m ²]	Zulage Stamm [m ²]
Heizkreis 1	2.85	13	37.1	1.0
Heizkreis 2	2.85	13	37.1	1.0
Heizkreis 3	2.85	13	37.1	1.0
Heizkreis 4	2.85	10.5	29.9	1.0
Summe A _{Matten} :			141.1	4

Mit der optimierten Belegungsplanung werden somit rund 145 m² Brutto-Fassadenfläche aktiviert. Der Belegungsgrad dieser Variante liegt somit bei 76% und somit in der gleichen Größenordnung wie der Belegungsgrad der umgesetzten Feldtestfassade. Der Unterschied ist, dass die Mattenfläche der optimierten Variante minimal größer ist und die thermisch aktivierte Fläche über die Vor- und Rücklaufleitungen kleiner, siehe Tabelle 10 und Tabelle 11.

Details Variante 2: Feldtestfassade mit Ausklink-Lösung

Die Belegungsplanung der zweiten Variante entspricht der Standard-Belegungsplanung der Variante 1. Das Konzept „Ausklinkung“ wurde zusammen mit dem Projektpartner „Berufsförderungsverein des baden-württembergischen Stuckateurhandwerks e.V.“ und dem Hersteller der Putzmaterialien entwickelt. Es verändert sich gegenüber der Variante 1 nur der Schichtaufbau der Fassade. Das Konzept lehnt sich an Ausklinkungen für Blitzschutzleitungen (siehe Abbildung 30) oder andere Leitungen an, unterscheidet sich aber in folgenden Punkten von der oben aufgeführten Variante 1 und Umsetzung an der Feldtestfassade:

- [1] Die Kapillarrohrmatten werden weiterhin mit ca. 10 mm Klebemörtel eingeputzt.
- [2] Die Stammrohre werden jedoch nicht mehr überputzt, sondern die Wärmedämmung wird an den entsprechenden Stellen ausgeklinkt. Eingesetzt wird hierzu ein entsprechendes Schneidewerkzeug, das auf jeder Baustelle zum Zuschnitt der Dämmplatten genutzt wird.

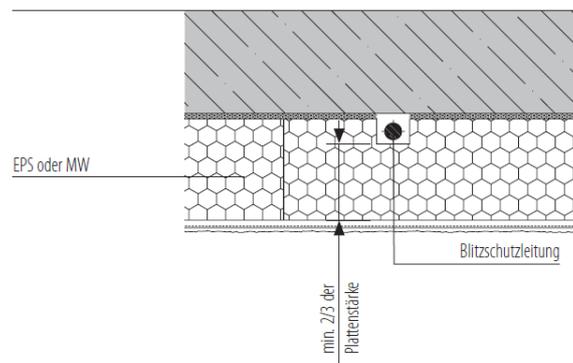


Abbildung 30: Beispiel für eine Ausklinkung der Wärmedämmung für eine Blitzschutzleitung⁹

Aus diesem Ansatz ergab sich eine Reihe von Fragestellungen, die zusammen mit den beteiligten Projektpartnern und Herstellern analysiert wurden. Diese Fragestellungen betrafen die minimale Klebefläche pro Dämmplatte, die minimale „Rest“-Plattenstärke der Dämmplatte und die Zeit und die Kostenermittlung für die Ausklinkung. Die Fragen konnten geklärt werden und für die Belegungsplanung nach Variante 1 wäre die Umsetzung der Ausklinklösung entsprechend diesem Ansatz möglich. Die Kosten für die Ausklinkung pro laufendem Meter wurden anhand einer Musterumsetzung ermittelt. Fotos dieser Umsetzung an einer Musterwand sind in Kapitel 1.5 dargestellt.

⁹ Abbildung entnommen aus: „Technische Systeminfo 6: WDV-Systeme zum Thema Brandschutz“, Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., Stand 03/2014, Seite 28, Abbildung 48

Vergleich und Diskussion

In Abbildung 31 ist ein Vergleich der Gesamtkosten und der flächenspezifischen Systemkosten für alle drei betrachteten Varianten aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass durch die Standardisierung der Belegungsplanung (V1) die spezifischen Kosten um knapp 20 €/m² reduziert werden können, im Vergleich zur Feldtestumsetzung (V0). Durch eine Einsparung des Überputzens in V2 können die Systemkosten weiter reduziert werden, auf einen Endwert von rund 72 €/m². Die Varianten V1 und V2 können als realistische Kostenschätzungen für die Umsetzung der aWT angesehen werden. Wobei bei allen drei Varianten mit den Listenpreisen der Hersteller gerechnet wurde, so dass bei einer größeren Umsetzung deutliche geringere Materialkosten zu erwarten sind. Bei den Kostenschätzungen im Vorprojekt „LEXU“, siehe Altgeld et al. (2010) wurden 2009 das Kunststoff-aWT-System auf 40-50 €/m² (netto, Material + Montage Kapillarrohre, ohne Einputzen) geschätzt. Für die hier betrachteten Varianten liegen die vergleichbaren Systemkosten bei 55-65 €/m². Inflationsbereinigt kann die Größenordnung der Kostenschätzung aus dem Vorprojekt somit durch die reale Umsetzung bestätigt und aktualisiert (Einputzen) werden.

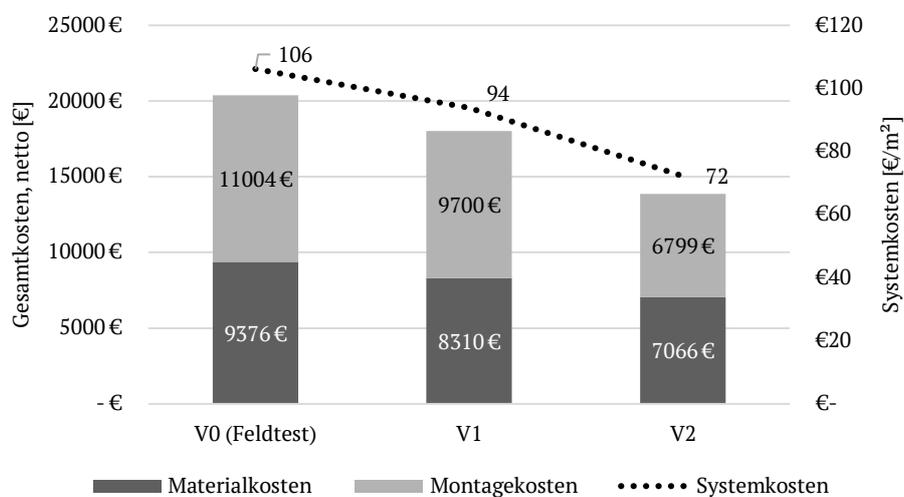


Abbildung 31: Überblick Gesamtkosten in € und flächenspezifische Systemkosten in €/m², bezogen auf die Brutto-Fläche der Fassade für die drei betrachteten Varianten (Systemkosten_aWH_Standard_V1_V2_Clina_BP.xls)

Betrachtet man für die Variante 1 die flächenspezifischen Systemkosten, bezogen auf die thermisch aktivierte Fläche, so liegen diese bei rund 124 €/m², siehe Tabelle 17. Die Anteile der einzelnen Komponenten und Arbeitsschritte sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die teuersten 6 Bestandteile machen in Summe bereits rund 94% der Gesamtkosten aus (117 €/124 €). Zu erkennen ist, dass alleine die Matten (Materialkosten) bereits rund ein Drittel der Gesamtkosten ausmachen. Rechnet man noch die Montage der Matten hinzu, ist man bereits bei 50% der Gesamtkosten. Daran sind die möglichen Optimierungspotentiale bzw. Kostenreduktionspotentiale in Bezug auf den Schichtaufbau und die Abläufe erkennbar.

Tabelle 19: Flächenspezifische Netto-Kosten der Komponenten und Arbeitsschritte, Variante „Standard“, V1

	Name	Preis [€/m ²]	Anteil [%] ¹⁰
1	Kapillarrohrmatten	≈ 36.5	29
2	Überputzen (Leichtputz)	≈ 26.9	22
3	Montage der Matten	≈ 26.5	21
4	Einputzen (Klebemörtel)	≈ 13.5	11
5	Leichtputz	≈ 8.5	7
6	Klebemörtel	≈ 5.5	4
7	Sonstiges	≈ 7.0	6
	Summe:	≈ 124	100

¹⁰ Bezogen auf die Gesamtkosten in Höhe von 124 €/m²

1.2.2 Optimierungspotential „Feldtestfläche aWT“

Das Optimierungspotential wurde teilweise bereits bei der Ermittlung der Systemkosten der Umsetzung und der optimierten Varianten ersichtlich. Es besteht mit Sicherheit ein Optimierungspotential bei der Anbringung der Kapillarrohrmatten und beim Schichtaufbau.

Bei der Anbringung ist eine Ablauf-Systematik bzw. eine Vorgabe der Art und Anzahl der Befestigungsmittel notwendig. Dies kann bzw. sollte nicht vom Verarbeiter vor Ort abhängig sein. In Bezug auf die Befestigungsmittel sind weitere Verbesserungen notwendig, zum Beispiel selbstklebende Befestigungsmittel für die provisorische Befestigung bis zum Einputzen bzw. Überputzen.

Beim Schichtaufbau sind Dickputzsysteme aus Kosten- und Zeitgründen zu vermeiden. Darüber hinaus ist eine teilweise (gezielte) Dübelung zu überlegen.

Generell sollte die Anzahl der Schnittstellen reduziert werden. Dies bedeutet in erster Linie einen Schritt in Richtung Vorfertigung, oder die Applikation von aWT und WDVS durch einen Handwerker/Verantwortlichen. Die aWT wurde an der Feldtestfassade als bauseitig erstelltes System ausgeführt. Das bedeutet, dass jede Schicht der Wandtemperierung einzeln und zum Teil von verschiedenen Verantwortlichen ausgeführt wurde. Dies führt auf der einen Seite zu Verzögerungen im Bauablauf (Koordination verschiedener Gewerke) und andererseits zu einer Vielzahl von Schnittstellen. In der Bauausführung resultierten diese Schnittstellen teilweise in Fehlern. Dies kann jedoch nicht als spezifisch für die Idee der aWT angesehen werden, sondern ist eher ein übliches Problem auf Baustellen (u.a. Kommunikation).

Abgesehen davon konnte die aWT entsprechend der Idee und den theoretischen Grundlagen aus dem Vorprojekt und der Konzeption aus dem aktuellen Projekt angebracht werden. Alle aufkommenden Fragestellungen konnten zusammen mit den Projektpartnern und den Herstellern der einzelnen Komponenten geklärt werden. Von außen betrachtet ist kein Unterschied zu einer nicht thermisch aktivierten Fassade erkennbar; abgesehen von der Luftklappe für die aLT und dem Verteilerkasten für die Heizkreise der aWT.

Als Optimierungspotential für zukünftige Umsetzungen oder Anwendungen sind die beiden oben aufgeführten Varianten (V1 & V2) zu nennen. Diese überführen die Prototypen-Umsetzung vom Feldtest in eine Standard-Umsetzung. Statt der Ausklink-Lösung könnte auch eine Art Dämmputz für das Überputzen der Matten verwendet werden und die Dämmstärke des WDVS demensprechend reduziert werden. Auch andere Rohrsysteme sind generell denkbar und wurden im Vorprojekt untersucht. Hier bestünde jedoch eine ähnliche Problematik bzgl. Ein- und Überputzen. Für zukünftige Projekte soll diese bauseitige Lösung zwar weiter untersucht und optimiert werden, der Fokus liegt jedoch auf vorgefertigten Lösungen, im besten Fall „aus einer Hand“.

1.3 Detaillierte Beschreibung der Feldtestflächen der aLT

Eine detaillierte Beschreibung der Feldtestflächen der aLT kann Schmidt (2019) im Anhang entnommen werden.

1.3.1.1 Fazit & Optimierungspotential „Feldtestfläche aLT“

Nach der Anbringung der Feldtestfläche kann folgendes Fazit bzgl. der Konzeption und Anbringung gezogen werden:

- In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und unter Zuhilfenahme von Simulationswerkzeugen konnte ein umsetzbares Konzept der aLT erarbeitet werden.
- Die Anbringung/Umsetzung der Feldtestfläche entsprechend der Konzeption ist ohne größere Probleme erfolgt.
- Auch die Inbetriebnahme der Feldtestfläche konnte erfolgreich gestaltet werden.
- Seit Inbetriebnahme läuft die Messdatenerfassung.
- Es konnten keine Schäden oder Alterungseinflüsse an der Feldtestfläche beobachtet werden.
- Bzgl. Optimierung können die folgenden Punkte aufgeführt werden:
 - Der Vorfertigungsgrad muss erhöht werden bzw. der Aufbau „professionalisiert“ werden.
 - Dies gilt auch in Bezug auf die Systemkosten der Feldtestfläche. Durch den geringen Vorfertigungsgrad fallen diese deutlich zu hoch aus.
 - Die Zugänglichkeit der MSR-Technik muss erhöht werden. Auch bzgl. Zuverlässigkeit und Funktionalität sind die verbauten Komponenten zu überarbeiten.
 - Das Thema Hygiene/Wartung wurde bisher nur ansatzweise bearbeitet. Für zukünftige Umsetzung sollte dies abschließend bearbeitet und geklärt werden (Zugangs- und Reinigungsmechanismen).
 - Die aLT sollte zu Konzepten mit einer Wärmerückgewinnung erweitert werden, nur dann lassen sich die energetischen Potentiale der aLT vollständig ausschöpfen.

1.4 Versuche mit der aWT-Feldtestfläche

Eine detaillierte Beschreibung der Versuche an der aWT-Feldtestfläche kann Schmidt (2020) im Anhang entnommen werden. Dort ist auch die Verifizierung der einzelnen Sensoren und der ermittelten Wärmeströme dargestellt.

1.4.1 Ermittlung der Basiskennlinie der aWT

Entsprechend DIN EN 1264-1 (2011) ist eine Basiskennlinie eine Kurve, die den Zusammenhang zwischen spezifischer Heizleistung (hier \dot{q}_1) und der mittleren Temperaturdifferenz ($\Delta T_{SR,m}$) zwischen Oberfläche ($T_{si,m}$) und Raum (T_{Raum}) beschreibt. In der Norm ist die Basiskennlinie bezogen auf Fußbodenheizungen, die mit Warmwasser durchströmt werden. In dieser Arbeit soll das Konzept der Basiskennlinie auf die aWT, also eine Wandtemperierung, die mit Sole durchströmt wird, übertragen werden. In DIN EN 1264-2 (2013) wird die Leistungsermittlung für Fußbodenheizungen beschrieben. In Abbildung 32 ist die Basiskennlinie einer Standard-Fußbodenheizung dargestellt.

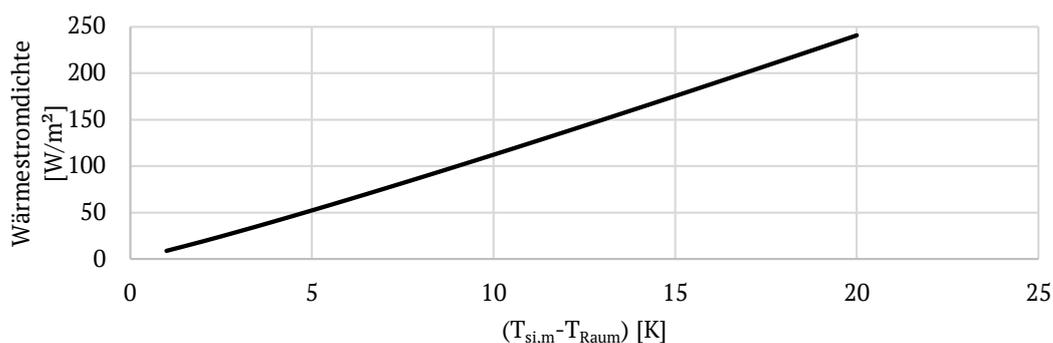


Abbildung 32: Basiskennlinie der Fußbodenheizung nach Norm

Die spezifische Wärmeleistung einer Fußbodenheizung entsprechend Abbildung 32 berechnet sich nach Norm folgendermaßen:

$$\dot{q} = 8.92 \cdot (T_{si,m} - T_{Raum})^{1.1} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (47)$$

Durch Messungen an der Feldtestfläche der aWT kann analog zur Basiskennlinie einer Fußbodenheizung auch die Basiskennlinie der aWT, anhand von Ergebnissen der Feldtestfassade, ermittelt werden:

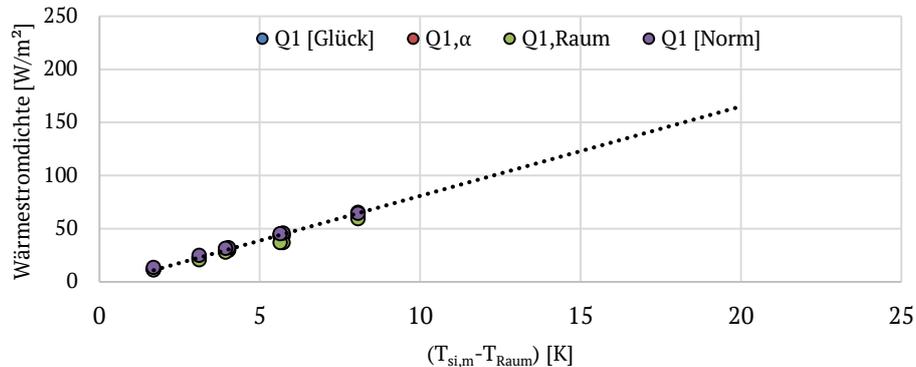


Abbildung 33: Stützstellen der Basiskennlinie der aWT (Ergebnisse aus den Messreihen)

Dabei entspricht jeder Kreis in Abbildung 33 einer aus den Temperatur-Messungen ermittelten Wärmestromdichte mit folgenden Grundlagen:

- [Glück]: nach Glück (1999).
- [Q1,α]: Entspricht der über die Näherung aus Kapitel 4.3.2 aus Schmidt (2019) ermittelten Wärmestromdichte ($\dot{Q}_{1,\alpha}$) mittels Berechnung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten.
- [Q1,Raum]: Entspricht der über die Näherung in Kapitel 4.3.1 aus Schmidt (2019) ermittelten Wärmestromdichte.
- [Norm]: Nach DIN EN 1264-5 (2009) wird der innere Wärmeübergangskoeffizient mit 8 W/(m²K) angesetzt.

Die spezifische Wärmeleistung der aWT, als Näherung aus Abbildung 33, lässt sich mit einem Heizkörperexponent von 1.1 approximieren:

$$\dot{q} = 6.57 \cdot (T_{si,m} - T_{Raum})^{1.1} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (48)$$

1.4.1.1 Diskussion und Vergleich

Vergleicht man die Basiskennlinie von Fußbodenheizung und aWT, siehe Abbildung 34, so erkennt man, dass die Kennlinie der FBH eine größere Steigung aufweist. Das bedeutet, dass bei gleicher Temperaturdifferenz dem Innenraum mehr Wärme zugeführt werden kann. Dies erklärt sich aus dem besseren Wärmeübergang bei horizontalen Oberflächen im Vergleich zu vertikalen Oberflächen. Dieser verbesserte Wärmeübergang drückt sich in einem höheren Wärmeübergangskoeffizienten aus, siehe Glück (2008) & DIN EN 1264-5 (2009). Laut der Norm liegt der stationäre Wärmeübergangskoeffizient einer FBH bei 10.8 W/(m²K) und einer Wandheizung (aWT) bei 8 W/(m²K). Für beide Kennlinien wurde somit ein Heizkörperexponent von 1.1 angesetzt. Über den Heizkörperexponenten wird die Verschiebung zwischen dem Strahlungs- und dem Konvektionsanteil dargestellt. Bei höheren (Über)Temperaturen steigt der konvektive Anteil, dessen Verlauf exponentiell genähert werden kann.

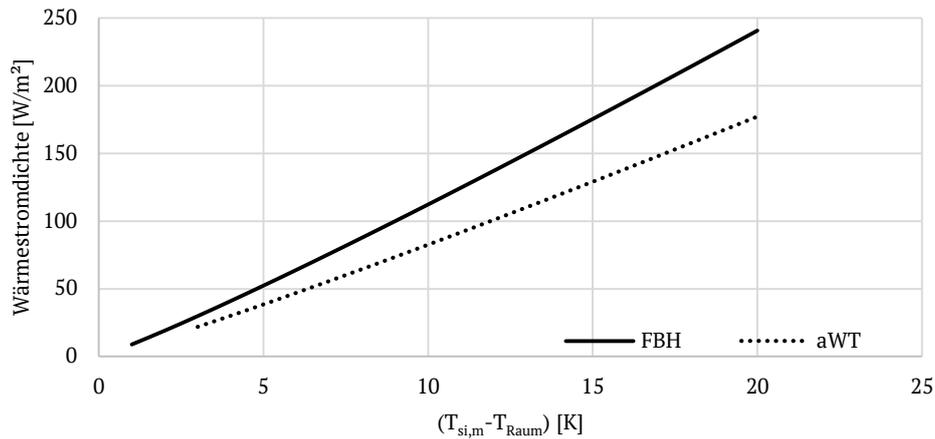


Abbildung 34: Vergleich der Basiskennlinie von Fußbodenheizung (FBH) und aWT

1.4.2 Ermittlung von Kennlinienfeldern für die aWT

Laut DIN EN 1264-1 (2011) ist ein Kennlinienfeld eine Kurve, die den systemabhängigen Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärmeleistung und der geforderten Temperaturdifferenz beschreibt, unter Berücksichtigung von relevanten Wärmeleitwiderständen. Diese Widerstände beziehen sich in der Norm primär auf oberflächennahe Beläge. Für das Konzept der aWT ist die Übertragung von Kennlinienfeldern für Bestandsstrukturen relevant. Diese können durch unterschiedliche Wärmeleitwiderstände ($R_{\lambda,E}$) dargestellt werden. In Anlehnung an DIN EN 1264-2 (2013) kann auf Grundlage der Messergebnisse der Feldtestfläche der aWT der spezifische Wärmestrom (\dot{Q}_1 bzw. \dot{q}_1) bestimmt werden. Hierbei wird die aWT behandelt, als würde es sich um eine Fußbodenheizung handeln, siehe Ansatz Typ D „Systeme mit Flächenelementen“. Unter Verwendung der logarithmischen Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel- und Raumtemperatur ΔT_H [K] berechnet sich der Wärmestrom \dot{q}_1 zu:

$$\Delta T_H = \frac{T_{VL} - T_{RL}}{\ln \frac{T_{VL} - T_{Raum}}{T_{RL} - T_{Raum}}} [K] \quad (49)$$

$$\dot{q}_1 = B \cdot a_B \cdot a_T^{m_T} \cdot a_u \cdot \Delta T_H [W/m^2] \quad (50)$$

Mit:

- ΔT_H Logarithmische Temperaturdifferenz [K]
- B Systemabh. Koeffizient zur Berechnung der Kennlinien, hier 6.5 [W/(m²K)]
- a_B Fußbodenbelag-Faktor []
- $a_T^{m_T}$ Rohrteilungsfaktor a_T und Faktor für den Rohraußendurchmesser m_T ; hier 1.06
- a_u Überdeckungsfaktor

Die Berechnung der einzelnen Terme aus Gleichung (50) kann DIN EN 1264-2 (2013) entnommen werden. Für die aWT ist vor allem der Überdeckungsfaktor a_u relevant.

$$a_u = \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_{u,0}}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_u}{\lambda_E}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_u}{\lambda_E}} + R_{\lambda,E} [] \quad (51)$$

Mit $\alpha = 10.8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $s_{u,0} = 0.045 \text{ m}$ und $\lambda_{u,0} = 1 \text{ W/(mK)}$. Über die beiden Parameter s_u [m] und λ_E [W/(mK)] kann die Bestandsstruktur der Außenwand als Überdeckungsfaktor eingegeben werden, siehe Abbildung 35. Zusätzlich muss der Fußbodenbelag-Faktor a_B berechnet werden:

$$a_B = \frac{1}{1 + B \cdot a_U \cdot a_T^{m_T} \cdot R_{\lambda,B}} [] \quad (52)$$

Hier berechnet sich $R_{\lambda,B}$ aus s_b und λ_B entsprechend Abbildung 35. Für die Wandheizung wird der Oberflächenbelag für die Abbildung des Innenputzes verwendet.

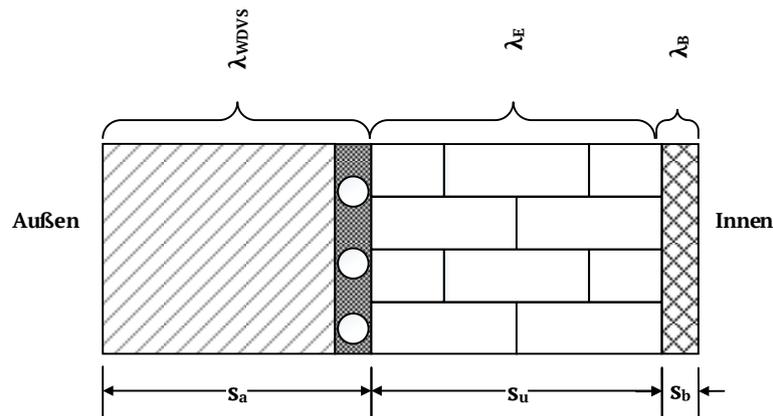


Abbildung 35: Parameter für die Berechnung der aWT als Wandheizung nach Norm

Entsprechend Abbildung 36 ergibt sich die Steigung der Geraden der Form $q = K_H \cdot \Delta T_H$ [W/m²] zu ca. $K_{H,FBH} = 3.5$ [W/(m²K)]

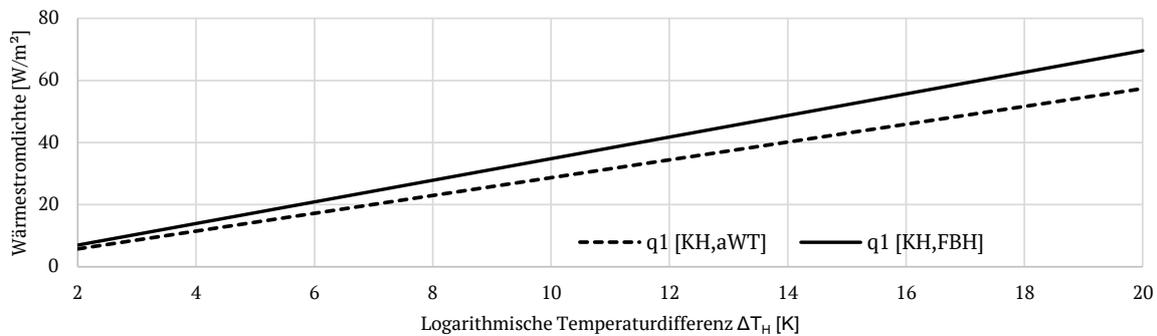


Abbildung 36: Wärmestromdichte über die logarithmische Temperaturdifferenz für die Feldtestfläche der aWT; berechnet als Fußbodenheizung [KH,FBH] und als aWT [KH,aWT] nach DIN EN 1264-2 (2013)

Nach DIN EN 1264-5 (2009) kann die Steigung $K_{H,FBH}$ für andere Heizflächen (Wand-, Deckenheizung...) umgerechnet werden. Dabei kann K_H auch als äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient betrachtet werden und ergibt sich nach Umrechnung für die aWT zu $K_{H,aWT} = 2.9$ [W/(m²K)], siehe Abbildung 36. Wobei die Kennlinie minimal unterhalb der Messergebnisse liegt. Eine lineare Näherung durch die Messergebnisse ergäbe eine Kennliniensteigung von rund 3.0 [W/(m²K)]. Dementsprechend gibt es eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Wärmestromdichte aus den Messungen und der berechneten Wärmestromdichte der aWT nach Norm. Bei, im Vergleich zur Feldtestumsetzung, gleich bleibendem $R_{\lambda,WDVS}$ & $R_{\lambda,B}$ (und Rohrsystem, Massenstrom usw.) ändert sich nur $R_{\lambda,E}$, daher kann die Wärmestromdichte der aWT auch für andere Bestandsstrukturen dargestellt werden. Gleichzeitig kann über den stationären Wirkungsgrad der aWT, entsprechend Kapitel I4.1.1, auch eine Relation von \dot{q}_1 zu \dot{q}_w entwickelt werden. Im Gegensatz zur Fußbodenheizung, bei der der Wärmestrom \dot{q}_2 nicht relevant ist, ist dieser bei der aWT zu beachten. Für eine Auslegung der aWT werden \dot{q}_1 (Heizwärmestrom in den Raum) und \dot{q}_w (gesamter Wärmestrom von der thermischen Aktivierung ins Bauteil) benötigt. Für unterschiedliche Bestandsstrukturen, repräsentiert durch den Wärmedurchgangswiderstand $R_{\lambda,E}$, ist in Abbildung 37 die Wärmestromdichte über die logarithmische Temperaturdifferenz aufgetragen. Mit $R_{\lambda,E}$ ändert sich auch der stationäre Wirkungsgrad der aWT. Die Abbildung 37 lässt sich folgendermaßen lesen: Eine Bestandswand (0.3 m, Vollklinker $\lambda = 0.96$ [W/(mK)], $R_{\lambda,E} \approx 0.3$ [W/K]) wird mit dem Wandaufbau entsprechend der Feldtestumsetzung saniert. Bei ΔT_H von 10 K kann bei dieser Umsetzung eine Nutzwärmestromdichte von rund 22 W/m² und eine maximale spezifische Heizleistung von knapp 45 W/m² erreicht werden.

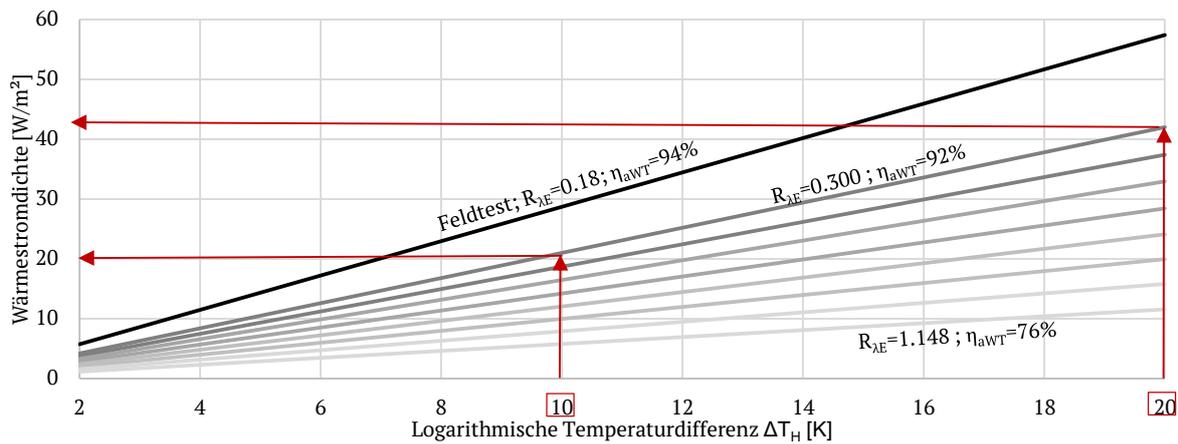


Abbildung 37: Berechnete Wärmestromdichte für unterschiedliche Bestandsstrukturen

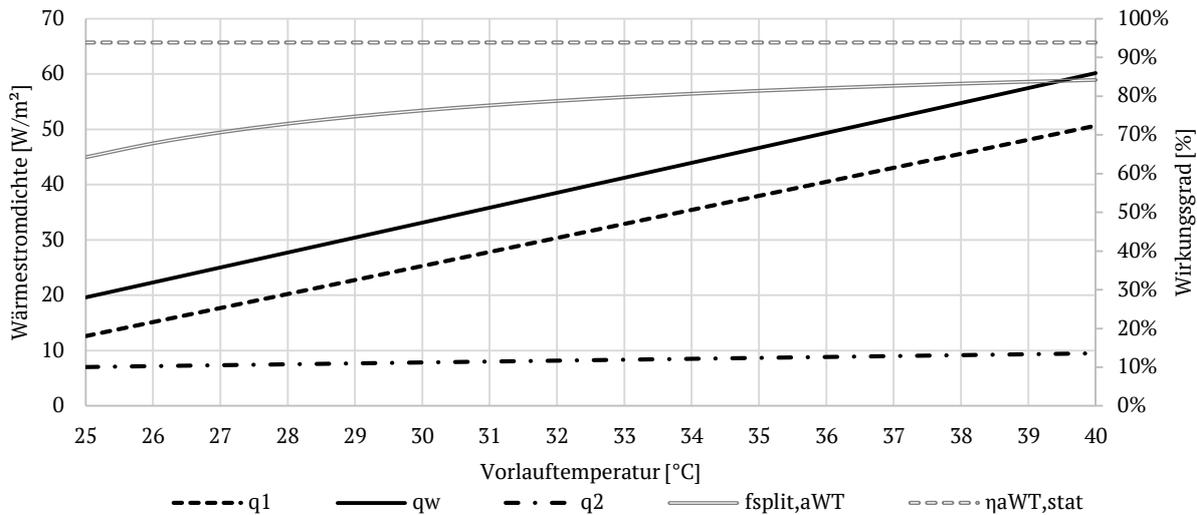


Abbildung 38: Wärmestromdichte über die Vorlauftemperatur für die Feldtestfassade bei $T_{\text{Raum}} = 20^\circ\text{C}$ & $T_{\text{amb}} = -12^\circ\text{C}$

In Abbildung 38 ist neben dem spezifischen Heizwärmestrom \dot{q}_1 auch der Verlustwärmestrom \dot{q}_2 und der gesamte Wärmestrom vom Rohr in die Konstruktion \dot{q}_w abgebildet. Zu erkennen ist, dass sich der Nutzwärmestrom (\dot{q}_1) in den Raum mit abnehmender Vorlauftemperatur der aWT deutlich verringert. Der Verlustwärmestrom (\dot{q}_2) bleibt nahezu konstant. Im Endeffekt verringert sich somit der spezifische Wirkungsgrad der aWT ($\eta_{\text{aWT, spez}}$, siehe Gl. (22)), während der stationäre Wirkungsgrad ($\eta_{\text{aWT, stat}}$, siehe Gl. (24)) konstant bleibt. Mit dieser Abbildung kann eine Auslegung der benötigten Heizfläche und des Wärmeerzeugers erfolgen. Das Konzept aus Abbildung 38 kann auf beliebige andere Bestandsstrukturen übertragen werden, sofern der neue Außenaufbau (Rohrsystem, WDVS – Dicke & WLG) gleich bleibt.

1.4.3 Ermittlung von Grenzkurven für die aWT

Bei Grenzkurven handelt es sich nach DIN EN 1264-1 (2011) um Kurven, in denen die oberen Grenzwerte für Wärmeleistung und Temperaturdifferenz für verschiedene Boden-Beläge dargestellt werden. Übertragen auf das Konzept der aWT sollen hier die oberen Grenzwerte in Bezug auf die Bestandsstruktur dargestellt werden.

Laut Norm DIN EN 1264-3 (2009) liegt die maximale Temperaturdifferenz zwischen Heiz(ober)fläche und Raum bei 20 K. In DIN EN 1264-5 (2009) wird ein Wärmeübergangskoeffizient von $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Wandheizungen vorgegeben. Demzufolge liegt die maximal theoretisch mögliche spezifische Wärmeleistung einer Wandtemperierung bei $160 \text{ W}/\text{m}^2$. Falls höhere Oberflächen(über)temperaturen zugelassen werden sollen, muss nach DIN EN 1264-3 (2009) die Einhaltung der physiologischen Einschränkungen nachgewiesen werden.

In Abbildung 39 sind für die Feldtestumsetzung der aWT nochmals die nach DIN EN 1264 berechneten Wärmeströme dargestellt. Zusätzlich wurde die innere Oberflächentemperatur T_{si}

berechnet und die Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur ΔT_{si} ($T_{Raum} = 20^\circ\text{C}$) bestimmt. Zu erkennen ist, dass erst bei einer Vorlauftemperatur von knapp über 70°C die maximal erlaubte Temperaturdifferenz ($\Delta T_{si} = 20\text{ K}$) erreicht wird. Bei dieser Vorlauftemperatur läge der Wärmestrom nach innen auch in der oben angegebenen Größenordnung ($\sim 160\text{ W/m}^2$). Andererseits sind nach DIN EN 1264 solche Vorlauftemperaturen in Bezug auf die Putzmaterialien nicht erlaubt (Gips- oder Kalkputz maximal 50°C). Alleine der niederexergetische Ansatz der aWT/aLT spricht gegen solch hohe Vorlauftemperaturen.

Somit handelt es sich bei der maximalen Wärmeleistung der Wandtemperierung von 160 W/m^2 in Bezug auf die aWT um einen rein theoretischen Wert. Da die Bestandswand der Feldtestumsetzung einen sehr schlechten U-Wert aufwies ($\sim 2.7\text{ W/(m}^2\text{K)}$), wären für alle Vergleichsstrukturen mit besseren Ausgangs-U-Werten noch höhere Vorlauftemperaturen notwendig, um die maximale innere Oberflächentemperatur zu erreichen. Daher bietet sich die Herangehensweise der Norm DIN EN 1264 nicht für eine Bestimmung der Grenzkurven einer außenliegenden Wandtemperierung an. Der Ansatz nach Norm erscheint nur für oberflächennahe Temperierungssysteme sinnvoll.

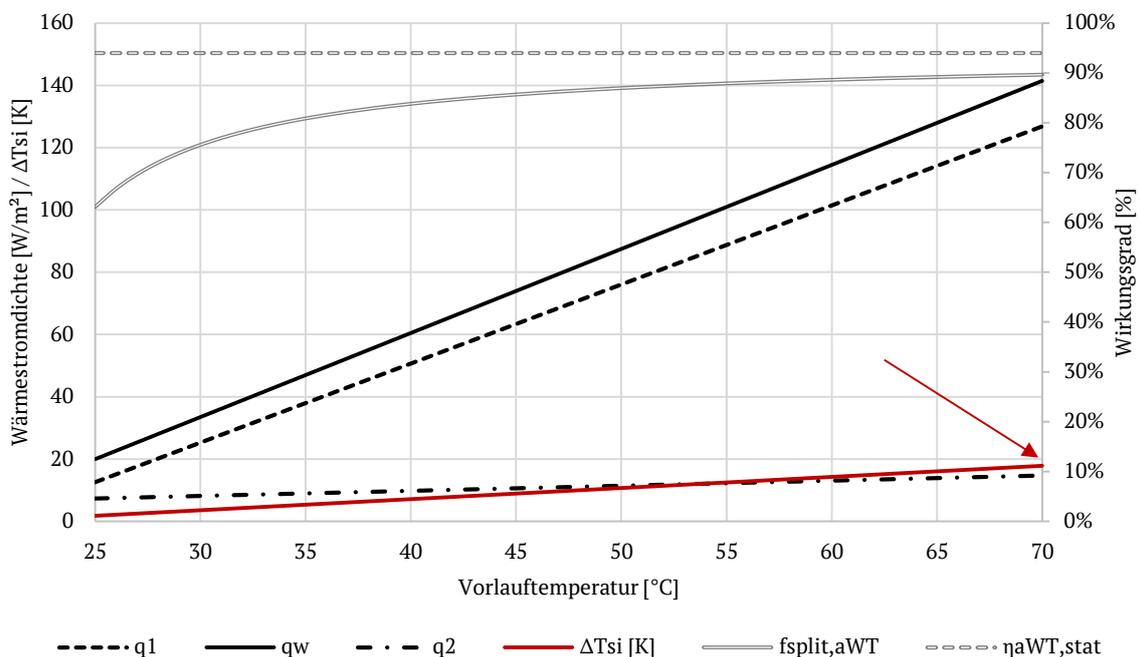


Abbildung 39: Wärmeströme über die Vorlauftemperatur für die Feldtestumsetzung der aWT

Stattdessen wird für die Übertragung der Feldtestumsetzung der aWT eine Grafik, in Anlehnung an Abbildung 9, erstellt. Hierbei wird der spezifische Nutzwärmestrom der aWT über die Vorlauftemperatur und den U-Wert der Bestandswand aufgetragen, siehe Abbildung 40. Es wurden die gleichen Annahmen wie in Kapitel 1.4.2 angesetzt ($T_{amb} = -12^\circ\text{C}$, $T_{Raum} = 20^\circ\text{C}$, ΔT_{aWT} entsprechend der Messergebnisse von der Feldtestfassade, thermische Aktivierung und WDVS entsprechend Umsetzung an der Feldtestfassade). Anhand von Abbildung 40 können reale Grenzwerte für die aWT, entsprechend der Feldtestumsetzung, abgelesen werden. Zum Beispiel können bei einer maximalen Vorlauftemperatur von 35°C maximal 39 W/m^2 an den Raum übertragen werden. Dieser Betriebspunkt entspricht auch der Auslegung der Wandtemperierung für die Feldtestfassade. Bei Bestandswänden mit geringerem U-Wert verringert sich die übertragbare Wärmeleistung dementsprechend bis auf rund 6.5 W/m^2 , bei einem U-Wert von $0.5\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Die gleiche Grafik kann für jeden beliebigen Wandaufbau (Kombination aus Bestandswand und thermischer Aktivierung) erstellt werden. An dieser Stelle wird sich auf die verifizierten Ergebnisse der Feldtestumsetzung beschränkt. Auch wird nur der überkompensatorische Betrieb dargestellt, da teilkompensatorischer Betrieb und kompensatorischer Betrieb sehr stark von der Raumtemperatur und Umgebungstemperatur abhängig sind. Daher sei darauf hingewiesen, dass bei einem positiven Wärmestrom \dot{q}_1 die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen bereits überkompensiert sind.

Mit Hilfe der Norm-Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raum ($\Delta T_{H,N}$) von 10 K lässt sich die spezifische Norm-Wärmeleistung $\dot{q}_{H,N}$ für flächenintegrierte Heizsysteme bestimmen, siehe DIN EN 1264-1 (2011). Für das Beispiel in Abbildung 40 sind diese Werte fett gedruckt. Für die Feldtestumsetzung mit einem U-Wert der ungedämmten Bestandswand von ca. 2.7 W/(m²K) liegt die spezifische Norm-Wärmeleistung somit bei rund 36 W/m².

U-Wert [W/m ² K]	Vorlauftemperatur der thermischen Aktivierung [°C]															
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
0.5	2.2	2.6	3.0	3.5	3.9	4.3	4.8	5.2	5.6	6.1	6.5	6.9	7.3	7.8	8.2	8.6
0.6	2.5	3.1	3.6	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6	7.1	7.7	8.2	8.7	9.2	9.7	10.2
0.7	3.0	3.6	4.2	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.1	9.7	10.3	11.0	11.6	12.2
0.8	3.5	4.2	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	9.8	10.5	11.2	11.9	12.6	13.3	14.0
0.9	3.9	4.7	5.5	6.3	7.1	7.8	8.6	9.4	10.2	11.0	11.8	12.6	13.3	14.1	14.9	15.7
1.0	4.4	5.3	6.1	7.0	7.9	8.8	9.7	10.6	11.4	12.3	13.2	14.1	15.0	15.8	16.7	17.6
1.1	4.8	5.8	6.8	7.7	8.7	9.7	10.7	11.6	12.6	13.6	14.6	15.5	16.5	17.5	18.4	19.4
1.2	5.3	6.4	7.4	8.5	9.6	10.6	11.7	12.7	13.8	14.9	15.9	17.0	18.1	19.1	20.2	21.3
1.3	5.8	7.0	8.1	9.3	10.5	11.6	12.8	14.0	15.1	16.3	17.5	18.6	19.8	21.0	22.1	23.3
1.4	6.2	7.5	8.8	10.0	11.3	12.5	13.8	15.0	16.3	17.6	18.8	20.1	21.3	22.6	23.8	25.1
1.5	6.7	8.1	9.4	10.8	12.1	13.5	14.8	16.2	17.5	18.9	20.2	21.6	22.9	24.3	25.7	27.0
1.6	7.2	8.7	10.1	11.6	13.1	14.5	16.0	17.4	18.9	20.3	21.8	23.3	24.7	26.2	27.6	29.1
1.7	7.7	9.3	10.8	12.4	14.0	15.5	17.1	18.6	20.2	21.7	23.3	24.8	26.4	28.0	29.5	31.1
1.8	8.2	9.9	11.5	13.2	14.8	16.5	18.1	19.8	21.4	23.1	24.7	26.4	28.0	29.7	31.4	33.0
1.9	8.7	10.5	12.3	14.0	15.8	17.5	19.3	21.1	22.8	24.6	26.3	28.1	29.8	31.6	33.4	35.1
2.0	9.2	11.1	12.9	14.8	16.6	18.5	20.4	22.2	24.1	25.9	27.8	29.6	31.5	33.4	35.2	37.1
2.1	9.7	11.7	13.6	15.6	17.5	19.5	21.4	23.4	25.3	27.3	29.2	31.2	33.1	35.1	37.1	39.0
2.2	10.2	12.3	14.3	16.4	18.5	20.5	22.6	24.6	26.7	28.8	30.8	32.9	34.9	37.0	39.1	41.1
2.3	10.8	12.9	15.1	17.3	19.4	21.6	23.8	25.9	28.1	30.3	32.4	34.6	36.7	38.9	41.1	43.2
2.4	11.3	13.6	15.9	18.2	20.5	22.7	25.0	27.3	29.6	31.9	34.1	36.4	38.7	41.0	43.3	45.5
2.5	11.9	14.2	16.6	19.0	21.4	23.8	26.2	28.6	31.0	33.3	35.7	38.1	40.5	42.9	45.3	47.7
2.6	12.4	14.9	17.4	19.9	22.4	24.8	27.3	29.8	32.3	34.8	37.3	39.8	42.3	44.8	47.3	49.8
2.7	12.9	15.5	18.1	20.7	23.3	25.9	28.5	31.1	33.7	36.3	38.9	41.5	44.1	46.7	49.3	51.9
2.8	13.5	16.2	18.9	21.6	24.3	27.0	29.8	32.5	35.2	37.9	40.6	43.3	46.0	48.8	51.5	54.2
2.9	14.0	16.9	19.7	22.5	25.4	28.2	31.0	33.9	36.7	39.5	42.3	45.2	48.0	50.8	53.7	56.5
3.0	14.6	17.6	20.5	23.5	26.4	29.3	32.3	35.2	38.2	41.1	44.1	47.0	49.9	52.9	55.8	58.8

Abbildung 40: Spezifischer Nutzwärmestrom (\dot{q}_1) der aWT in Abhängigkeit des U-Wertes der Bestandswand und der Vorlauftemperatur; mit $T_{Raum} = 20^\circ\text{C}$ und thermischer Aktivierung & WDVS (160mm, WLG032) entsprechend der Feldtestumsetzung

Die Grenzwärmeleistung der aWT, entsprechend der Feldtestumsetzung ist nach DIN EN 1264-2 (2013) bei einer Raumtemperatur von 20°C und einer maximalen inneren Oberflächentemperatur von 29°C zu berechnen (mit einer Spreizung von 0 K). Bei diesen Bedingungen berechnet sich die Grenzwärmeleistung \dot{q}_G zu maximal 72 W/m². Die maximale innere Oberflächentemperatur richtet sich nach der thermischen Behaglichkeit, und hier maßgebend nach der Arbeit von Fanger (1970). Für Randzonen mit einer erlaubten Oberflächentemperatur von 35°C ergäbe sich eine Grenzwärmeleistung $\dot{q}_{G,Rand}$ von 105 W/m². Bei der Betrachtung von Wandtemperierungen erscheint es jedoch nicht sinnvoll von Randbereichen zu sprechen. Die maximalen inneren Oberflächentemperaturen können im Betrieb der aWT bei Vorlauftemperaturen >40°C erreicht werden, abhängig vom U-Wert der Bestandswand und der Raumtemperatur, siehe z.B. in Abbildung 39.

Alternativ zu Abbildung 40 kann der Nutzwärmestrom auch über die mittlere Temperatur der aWT, dargestellt werden, siehe Abbildung 41.

U-Wert [W/m²K]	Mittlere Temperatur der thermischen Aktivierung [°C]																
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
0.5	2.0	2.4	2.9	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	5.9	6.4	6.8	7.3	7.8	8.3	8.8	9.3	
0.6	2.3	2.9	3.5	4.0	4.6	5.2	5.8	6.4	6.9	7.5	8.1	8.6	9.2	9.8	10.4	10.9	
0.7	2.8	3.4	4.1	4.8	5.5	6.2	6.9	7.6	8.3	8.9	9.6	10.3	11.0	11.7	12.4	13.0	
0.8	3.2	3.9	4.7	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.0	11.8	12.6	13.4	14.2	14.9	
0.9	3.6	4.4	5.3	6.2	7.0	8.0	8.9	9.8	10.7	11.5	12.4	13.3	14.2	15.1	15.9	16.8	
1.0	4.0	5.0	6.0	6.9	7.9	9.0	9.9	11.0	12.0	12.9	13.9	14.9	15.9	16.9	17.9	18.8	
1.1	4.4	5.5	6.6	7.6	8.7	9.9	11.0	12.1	13.2	14.3	15.3	16.4	17.6	18.6	19.7	20.8	
1.2	4.8	6.0	7.2	8.4	9.5	10.8	12.0	13.3	14.5	15.6	16.8	18.0	19.2	20.4	21.6	22.8	
1.3	5.3	6.6	7.9	9.2	10.5	11.9	13.1	14.5	15.8	17.1	18.4	19.7	21.1	22.4	23.7	24.9	
1.4	5.7	7.1	8.5	9.9	11.3	12.8	14.2	15.7	17.0	18.4	19.8	21.2	22.7	24.1	25.5	26.9	
1.5	6.1	7.6	9.2	10.6	12.1	13.8	15.2	16.9	18.4	19.8	21.3	22.8	24.4	25.9	27.4	28.9	
1.6	6.6	8.2	9.9	11.5	13.0	14.8	16.4	18.2	19.8	21.4	23.0	24.6	26.3	27.9	29.5	31.1	
1.7	7.0	8.7	10.5	12.2	13.9	15.8	17.5	19.4	21.1	22.8	24.5	26.2	28.1	29.8	31.5	33.2	
1.8	7.5	9.3	11.2	13.0	14.8	16.8	18.6	20.6	22.4	24.2	26.1	27.9	29.9	31.7	33.5	35.3	
1.9	7.9	9.9	11.9	13.8	15.8	17.9	19.8	21.9	23.9	25.8	27.7	29.7	31.8	33.7	35.7	37.6	
2.0	8.4	10.4	12.6	14.6	16.6	18.9	20.9	23.1	25.2	27.2	29.3	31.3	33.5	35.6	37.6	39.7	
2.1	8.8	11.0	13.2	15.4	17.5	19.9	22.0	24.4	26.5	28.7	30.8	33.0	35.3	37.4	39.6	41.7	
2.2	9.3	11.6	13.9	16.2	18.4	20.9	23.2	25.7	27.9	30.2	32.5	34.7	37.2	39.5	41.7	44.0	
2.3	9.8	12.2	14.7	17.0	19.4	22.0	24.4	27.0	29.4	31.8	34.1	36.5	39.1	41.5	43.9	46.3	
2.4	10.3	12.8	15.4	17.9	20.4	23.2	25.7	28.4	30.9	33.5	36.0	38.5	41.2	43.7	46.2	48.7	
2.5	10.8	13.4	16.2	18.8	21.4	24.3	26.9	29.8	32.4	35.0	37.6	40.3	43.1	45.8	48.4	51.0	
2.6	11.3	14.0	16.9	19.6	22.3	25.3	28.1	31.1	33.8	36.6	39.3	42.0	45.0	47.8	50.5	53.3	
2.7	11.7	14.6	17.6	20.4	23.3	26.4	29.3	32.4	35.3	38.1	41.0	43.8	47.0	49.8	52.7	55.5	
2.8	12.3	15.2	18.4	21.3	24.3	27.6	30.6	33.8	36.8	39.8	42.8	45.8	49.0	52.0	55.0	58.0	
2.9	12.8	15.9	19.1	22.3	25.3	28.8	31.9	35.3	38.4	41.5	44.6	47.7	51.1	54.2	57.3	60.4	
3.0	13.3	16.5	19.9	23.2	26.4	29.9	33.2	36.7	39.9	43.2	46.4	49.7	53.2	56.4	59.7	62.9	

Abbildung 41: Spezifischer Nutzwärmestrom (\dot{q}_1) der aWT in Abhängigkeit des U-Wertes der Bestandswand und der mittleren Temperatur der aWT; mit $T_{Raum} = 20^\circ C$ und thermischer Aktivierung & WDVS (160mm WLG032) entsprechend Feldtestumsetzung

1.4.4 Ermittlung der Zeitkonstanten

Die Zeitkonstanten der aWT und aLT sollen mit (proportionalen) Regelstrecken aus der Regelungstechnik ermittelt werden, siehe z.B. Schneider & Berthold (2016) Bezüglich der Art der Regelstrecke ist zu beachten, ob das Zeitverhalten mit oder ohne Totzeit auftritt.

1.4.4.1 Aufheizvorgang

Beim Aufheizvorgang der aWT handelt es sich um eine Regelstrecke mit Totzeit, da die innere Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Flächen erst nach Ablauf einer Totzeit ansteigt. Typischerweise ergibt sich für die innere Oberflächentemperatur ein S-förmiger Verlauf. Dieser beginnt nach einer Totzeit mit einer zunehmenden Anstiegsgeschwindigkeit bis zum Wendepunkt. Anschließend nimmt die Geschwindigkeit ab und läuft dann in den konstanten Beharrungswert. Der Verlauf kann durch die Lage und die Steigung einer Tangente durch den Wendepunkt charakterisiert werden. Mit Hilfe der Tangente ergeben sich die beiden Zeitabschnitte:

-  Verzugszeit (t_u)
-  Ausgleichszeit (t_g)

In Anlehnung an Schneider & Berthold (2016) kann der Kennwert „Schwierigkeitsgrad“ (S) aus Verzugszeit und Ausgleichszeit berechnet werden. Über den Schwierigkeitsgrad lässt sich die Regelbarkeit der Komponente bestimmen, siehe Tabelle 20.

$$S = \frac{t_u}{t_g} \quad [] \quad (53)$$

Tabelle 20: Regelbarkeit in Abhängigkeit der Schwierigkeit „S“ nach Schneider und Berthold (2016)

S	Regelbarkeit
> 0.65	sehr schlecht
0.4 – 0.65	schlecht
0.2 – 0.4	befriedigend
0.1 – 0.2	gut
< 0.1	sehr gut

In Abbildung 42 ist ein solcher Aufheizvorgang dargestellt. Mit Hilfe einer Tangente durch den Wendepunkt können die Verzugszeit und die Ausgleichszeit bestimmt werden. In diesem Fall liegt die Verzugszeit (t_u) bei 155 Min, respektive 2.6 h und die Ausgleichszeit (t_g) bei 1075 Min, respektive 17.9 h. Die Schwierigkeit ergibt sich hier zu 0.14 [] und die Regelbarkeit kann somit mit „gut“ eingeordnet werden.

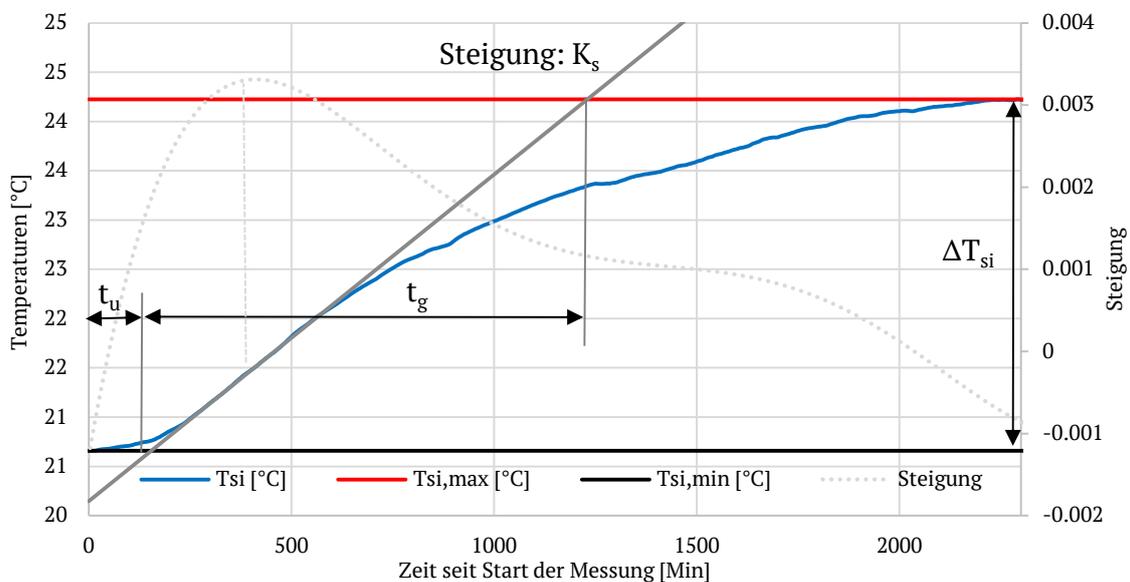


Abbildung 42: Beispielhafte Darstellung des Aufheizvorgangs von Messung 4; mit Ermittlung von Verzugszeit (t_u) und Ausgleichszeit (t_g)

Für die weiteren Messungen wird auf die Darstellung der Kurven verzichtet und nur die Ergebnisse in Tabellenform dargestellt. Zu berücksichtigen ist, dass die Versuchsbedingungen in den Feldtesträumen nicht reproduzierbar sind bzw. nur teilweise beeinflussbar. So ergibt sich z.B. die Raumtemperatur i.A. aus der Umgebungstemperatur und der Nutzung des Raumes. Dadurch wird auch die Starttemperatur der Messungen beeinflusst. Es können somit keine „Laborbedingungen“ erzeugt werden. Es gibt (mindestens) drei instationäre Temperaturverläufe, die zeitgleich auf das Bauteil einwirken (+ zusätzlich Ein- bzw. Abstrahlung):

- 🌿 Umgebungsbedingungen: Tagesgang der Umgebungstemperatur und Ein-/Abstrahlung.
- 🌿 Bedingungen im Innenraum: Tagesgang der Raumtemperatur (abhängig vom „Rest“ des Gebäudes, der Umgebungstemperatur, der Nutzung und der Wärmeabgabe der aWT).
- 🌿 Temperaturverlauf in der Temperierungsebene (Schwankungen z.B. durch Wärmepumpe und sich verändernde Rücklauftemperaturen möglich).

Daher wurde der Temperaturverlauf aus Abbildung 42 mit dem validierten HEAT-Modell aus Schmidt (2019) simuliert. Der Verlauf von gemessener und simulierter Oberflächentemperatur ist in Abbildung 43 dargestellt. Man erkennt, dass es beim zeitlichen Verlauf von beiden Ergebnissen zu Abweichungen kommt, die Start- und Endtemperatur jedoch jeweils sehr gut übereinstimmen. Bezogen auf den zeitlichen Verlauf können die Abweichungen aus den Startbedingungen der Simulation resultieren.

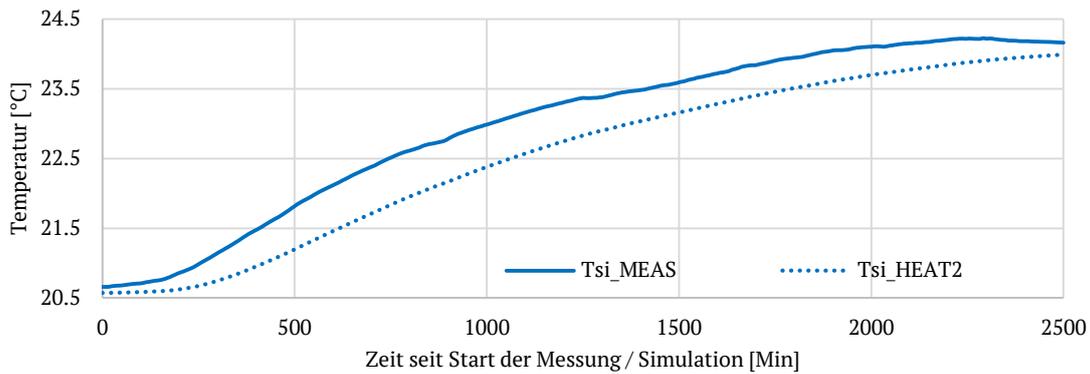


Abbildung 43: Vergleich von gemessener (MEAS) und simulierter (HEAT) Oberflächentemperatur

Im HEAT-Modell können nun in einem ersten Schritt zwei der drei Randbedingungen fixiert werden, und zwar die Umgebungstemperatur auf einen Mittelwert von 6,2°C und die Raumtemperatur auf einen Mittelwert von 21,15°C (Tsi_HEAT2_1). In einem zweiten Schritt wird die Temperatur in der Temperierungsebene als Sprungfunktion (28°C) modelliert (Tsi_HEAT2_2). Ein Vergleich der daraus resultierenden Temperaturverläufe ist in Abbildung 44 dargestellt.

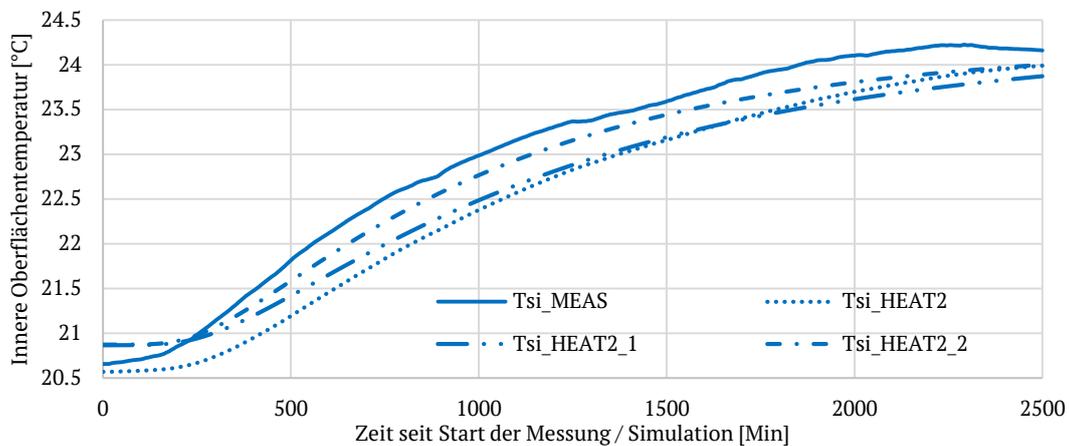


Abbildung 44: Vergleich der Temperaturverläufe für Messung und Modellierung mit HEAT unter Fixierung Raum- und Außentemperatur (Tsi_HEAT2_1) und Modellierung mit Sprungfunktion (Tsi_HEAT2_2)

Zu erkennen ist, dass eine Fixierung der Randbedingungen nur einen minimalen Effekt auf den Temperaturverlauf auf der Innenoberfläche hat (Tsi_HEAT2_1). Modelliert man zusätzlich einen Temperatursprung in der Temperierungsebene direkt auf die maximale Temperatur von rund 28°C (Tsi_HEAT2_2), so ergibt sich ein idealisierter Verlauf, mit den Startbedingungen aus der Messung. Für alle vier Verläufe wurden die beiden oben beschriebenen Zeiten (t_u & t_g) berechnet und verglichen, siehe Tabelle 21. Für den gemessenen Temperaturverlauf (MEAS) wird die größte Steigung ermittelt, hier verläuft der Temperaturanstieg am schnellsten und auch schneller als für die simulierte Variante mit dem Zeitsprung. Betrachtet man sich den Verlauf der Temperaturen in Abbildung 44 genauer, so erkennt man, dass alle simulierten Varianten eine nahezu identische „Totzeit“ haben (rund 250 Min) und die Temperatur anschließend ansteigt. Die gemessene Temperatur steigt deutlich früher an, was darauf hindeuten kann, dass sich die Außenwand zu diesem Zeitpunkt schon nicht mehr im stationären Zustand befand (Umgebungsbedingungen), also die Startbedingungen zwischen Simulation und Messung nicht übereinstimmen. Bzgl. des Verlaufs stimmen der gemessene und die simulierten Verläufe sehr gut überein.

Tabelle 21: Vergleich der Zeitkonstanten für die Messung (MEAS) und die simulierten Varianten (HEAT)

Name	t_u [h]	t_g [h]	S []	K_s [K/h]	Beschreibung
Tsi_MEAS	2.6	17.9	0.14	0.19	Gemessene Oberflächentemperatur
Tsi_HEAT2	4.25	22.5	0.19	0.15	Simulierte Oberflächentemperatur als Ergebnis der Inputs aus den Messungen
Tsi_HEAT2_1	4.3	21.9	0.20	0.14	Simulierte Oberflächentemperatur mit fixierten Randbedingungen (T_{Raum} & T_{amb})
Tsi_HEAT2_2	4.0	19.25	0.21	0.16	Simulierte Oberflächentemperatur mit modellierter Sprungfunktion im Kern

Wertet man die Zeitkonstanten für alle durchgeführten Messreihen aus, so ergeben sich die Werte entsprechend Tabelle 21. Die ermittelten Zeitkonstanten sind nur schwer miteinander vergleichbar. Entsprechend der Ergebnisse aus Tabelle 21 liegt die Vermutung nahe, dass die (schwankenden) Umgebungsbedingungen einen zu großen Einfluss auf die Zeitkonstanten haben, um diese sinnvoll miteinander vergleichen zu können. Bei der Messung „M1“ z.B. war die Wand nicht vollständig vom Vorversuch ausgekühlt, daher die deutlich abweichenden Ergebnisse. Bei keiner Messung herrschen gleiche Verhältnisse bzw. konnte auch keine der Messungen bei genau gleichen Bedingungen gestartet werden, da diese nicht beeinflussbar sind. Der Temperatursprung von 5 K und 25 K wurde anschließend nochmal in HEAT2 modelliert, mit einer fixierten Raumtemperatur von 21°C und einer fixierten Umgebungstemperatur von 0°C, siehe Ergebnisse in Tabelle 23.

Tabelle 22: Zeitkonstanten der Messreihen „Aufheizvorgang“ mit Bezug auf der Änderung der Kerntemperatur

Nr.	ΔT_k [K]	t_u [h]	t_g [h]	S []	K_s [K/h]
M1	~16	4.8	17.6	0.27	0.32
M2	~16	2.8	18.0	0.14	0.37
M3	~12	2.1	23.6	0.08	0.22
M4	~8	2.6	17.9	0.14	0.19
M5	~4	1.3	9.75	0.14	0.09
M8	~24	2.6	23.5	0.11	0.59

Aus der Simulation ergeben sich die erwarteten Ergebnisse. So liegt die Totzeit des Wandaufbaus der Feldtestfassade bei fixierten Randbedingungen bei rund 3.5 h. Auch der Wert für die Steigung (K_s) ist für einen gegebenen Wandaufbau abhängig vom Temperatursprung. Diese Abhängigkeit ist auch bei den ausgewerteten Messergebnissen in Tabelle 22 erkennbar: Je größer der Temperatursprung, desto größer die maximale Steigung der Geraden durch den Wendepunkt (K_s) des Temperaturverlaufs. Dies ergibt sich aus der direkten Abhängigkeit von T_{si} und T_k . Zwischen Messung „M8“ ($\Delta T \sim 24$ K) und dem simulierten Temperatursprung mit 25 K gibt es eine gute Übereinstimmung.

Somit lassen sich die Zeitkonstanten aus der Messung anhand der simulierten Ergebnisse verifizieren. Für weitere Betrachtungen zu dieser Thematik bieten sich numerische Lösungen an, da bei den Messungen zu viele Einflussfaktoren nicht beeinflusst werden können.

Tabelle 23: Zeitkonstanten aus HEAT für einen Temperatursprung von 5 K und von 25 K

ΔT_k [K]	t_u [h]	t_g [h]	S []	K_s [K/h]
5	3.5	22.25	0.16	0.10
25	3.5	22.25	0.16	0.51

Modelliert man den Temperaturverlauf der Innenoberfläche nur über die minimale Oberflächentemperatur, die Gerade durch den Wendepunkt mit der Steigung K_s und der maximalen Oberflächentemperatur, so ergeben sich für eine Raumtemperatur von 21°C und eine Umgebungstemperatur von 0°C für die Feldtestfassade die folgenden Kennlinien, siehe Abbildung 45. Die Verzugs- und Ausgleichzeit liegt für alle Temperatursprünge gleich, lediglich die Steigung K_s verändert sich, in Abhängigkeit des Temperatursprungs.

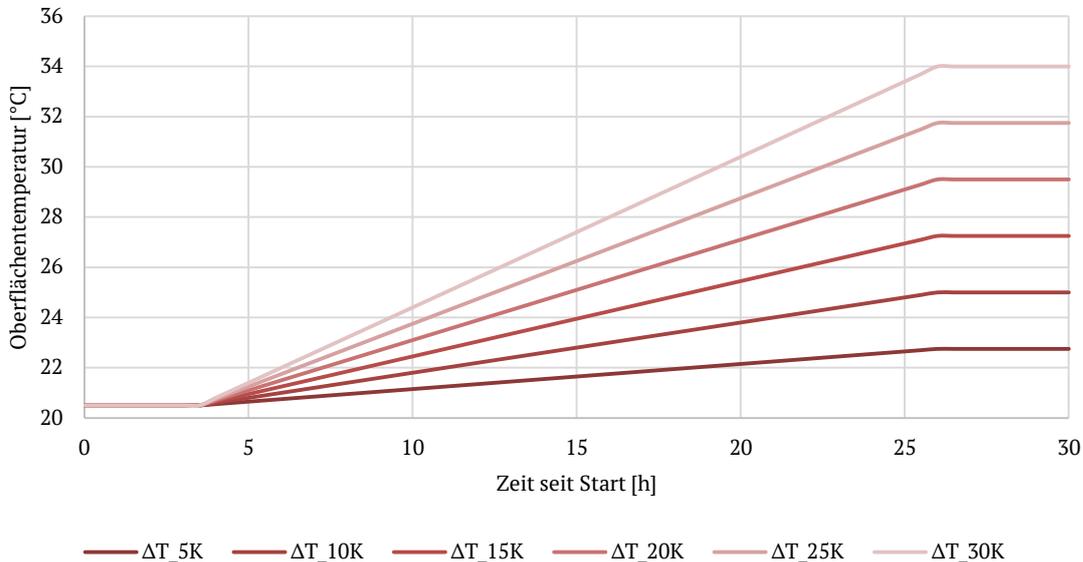


Abbildung 45: Verlauf der inneren Oberflächentemperatur über die Zeit bei verschiedenen Temperatursprüngen in der Temperierungsebene; Ergebnisse linearisiert berechnet

1.4.4.2 Abkühlvorgang (freies Abkühlen)

In Abbildung 46 ist die Abkühlkurve einer Messreihe dargestellt. Man erkennt, dass beim Abkühlvorgang nach einer bestimmten Totzeit die innere Oberflächentemperatur abfällt. Gleichzeitig ist auch ersichtlich, dass der Abkühlvorgang (bezogen auf die innere Oberflächentemperatur) sehr abhängig von der Raumtemperatur ist. Noch bei hohen Oberflächentemperaturen sind kleine Schwankungen mit dem Verlauf der Raumtemperatur erkennbar. Je geringer die Oberflächentemperatur ist, desto ausgeprägter ist der Einfluss der Raumtemperatur. Nach ca. 4000 Min kommt es erstmals zu einer Stagnation der Oberflächentemperatur und nach ca. 6000 Min erstmals wieder zu einem Anstieg, obwohl die aWT (Volumenstrom) ausgeschaltet ist. Ähnlich dem Aufheizvorgang ist der Einfluss der Umgebungsbedingungen somit auch beim Abkühlvorgang sehr groß und an der Feldtestfassade nicht beeinflussbar. Eine weitere Auswertung des Abkühlvorgangs erfolgt daher numerisch mit HEAT2.

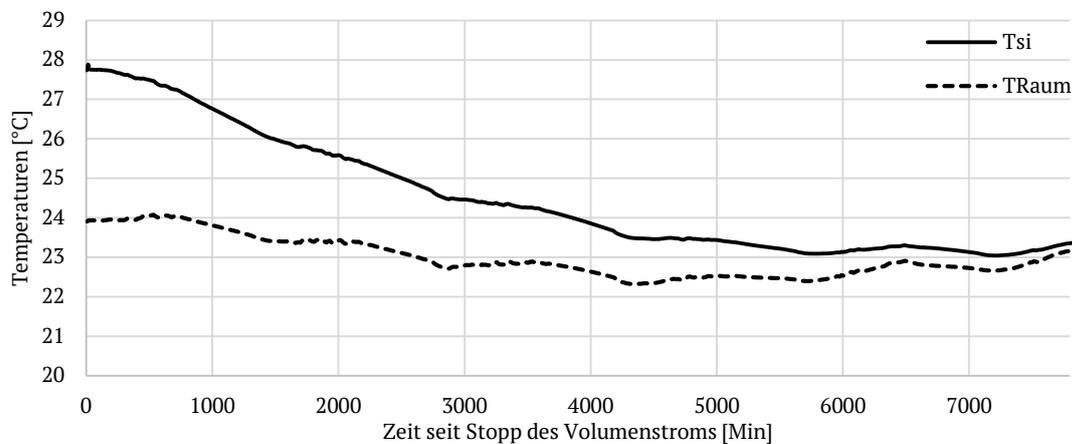


Abbildung 46: Abkühlkurve einer Messreihe (Raum- und Oberflächentemperatur über die Messzeit)

In Abbildung 47 ist der Verlauf der inneren Oberflächentemperatur nach dem Abschalten der aWT ($T_k = 35^\circ\text{C}$) dargestellt. Bei dieser Modellierung wurde die Raumtemperatur mit 21°C angesetzt und die Umgebungstemperatur mit 0°C . Auch hier ist eine Totzeit zu erkennen und im Anschluss daran der charakteristische Temperaturabfall, ohne Beeinflussung durch schwankende Umgebungsbedingungen.

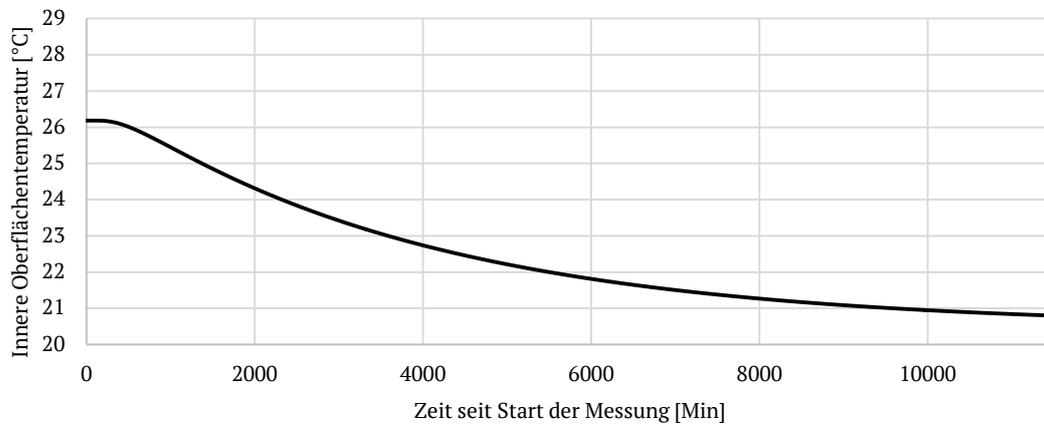


Abbildung 47: Verlauf der inneren Oberflächentemperatur T_{si} nach Abschaltung der aWT, bei einer Raumtemperatur von 21°C und einer Außentemperatur von 0°C

Wertet man die Zeitkonstanten für den Abkühlvorgang aus, siehe Abbildung 48, so ergibt sich eine Verzugszeit (t_u) von 4,8 h und eine Ausgleichszeit (t_g) von rund 82 h. Für K_s wird ein Wert von $-0,065 \text{ K/h}$ ermittelt. Diese Werte liegen deutlich unter den Werten für den Aufheizvorgang, siehe Tabelle 24 im Vergleich zu Tabelle 23. In Anlehnung an Abbildung 45 wurde Abbildung 49 erstellt. Beim Vergleich der beiden Abbildungen fallen nochmal die deutlich größeren Zeitkonstanten des Abkühlvorgangs auf. Da es sich um ein freies Abkühlen, also ohne Wärmestrom oder Wärmeentzug durch die aWT handelt, liegen die Zeitkonstanten deutlich höher als beim Aufheizvorgang.

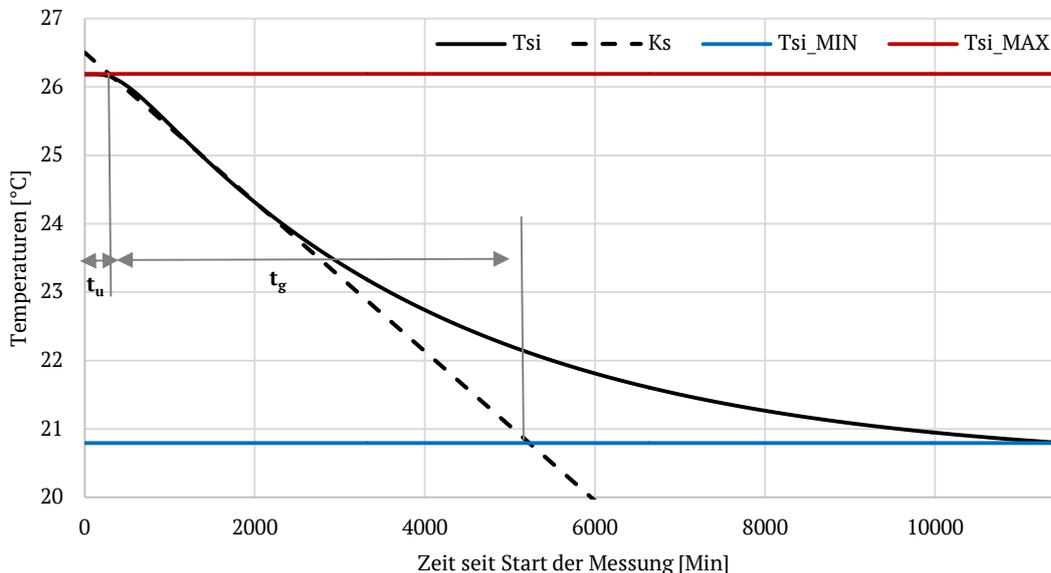


Abbildung 48: Auswertung der Zeitkonstanten für den Abkühlvorgang

Tabelle 24: Zeitkonstanten aus HEAT für einen Abkühlvorgang der Kerntemperatur von ca. 5 K und 15 K

ΔT_k [K]	t_u [h]	t_g [h]	S []	K_s [K/h]
5	4.8	82.3	0.06	-0.023
15	4.8	82.3	0.06	-0.065

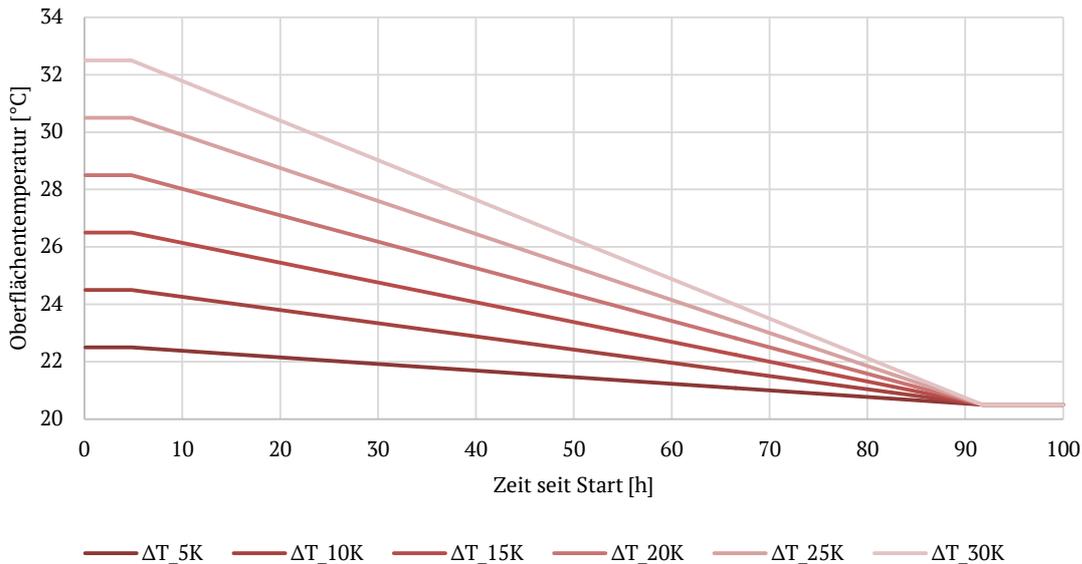


Abbildung 49: Verlauf der inneren Oberflächentemperatur über die Zeit bei verschiedenen Abkühlkurven; Ergebnisse berechnet¹¹

1.4.5 Gesamtauswertung & Diskussion der Versuche am Demonstrator

In einem ersten Schritt konnte die verbaute Sensorik in Betrieb genommen werden und auch die relevanten Sensoren verifiziert werden. Es wurden mehrere Berechnungswege für den Nutzwärmestrom der aWT (\dot{Q}_1) identifiziert und durch weitere Messungen mit einer Wärme-flussplatte verifiziert. Bezogen auf den Gesamt-Wärmestrom (\dot{Q}_w) kommt es zu Wärmeab-flüssen, neben \dot{Q}_1 & \dot{Q}_2 , in Höhe von 15 bis 20%. In diesem Wert ist jedoch zusätzlich die Ungenauigkeit der Messkette, vom Sensor bis zur Datenerfassung/Messrechner enthalten. Insofern scheint die Größenordnung des Wertes, als Summe der Messungenauigkeit und der Wärmeabflüsse über die Bauteilränder, erklärbar.

Umgekehrt zeigen die Messergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen Betrachtungen, so dass die theoretischen Betrachtungen also auch für die reale, bewetterte und bewohnte Umsetzung übernommen werden können. Anhand der oben erstellten Kennlinienfelder kann die aWT für beliebige Gebäude ausgelegt werden, solange die thermische Aktivierung und das WDVS entsprechend der Feldtestumsetzung gewählt werden. Als Größenordnung für übliche Bestandswände und übliche Vorlauftemperaturen kann für \dot{q}_1 eine Wärmestromdichte im Bereich von 20 – 25 W/m² angesetzt werden. Für die Verluste von ungedämmten Stammrohren (unkontrollierbarer Wärmeeintrag in die Fassade) kann für übliche Vorlauftemperaturen eine Größenordnung von 6 – 10 W/m (Bezogen auf die Länge der Stammrohre) angenommen werden. Auch der Pumpenstrombedarf kann anhand der Ergebnisse hochgerechnet und bewertet werden. Für Standard-Anwendungen und den spezifischen Nenn-Massenstrom der aWT von 12.5 kg/(hm²) kann für die benötigte Pumpenleistung ein Wert von 0.36 W/m² angesetzt werden. Ein Vergleich von Messungen mit unterschiedlichen spezifischen Massenströmen brachte keine nennenswerten Vorteile bei höheren Massenströmen, im Vergleich zum spezifischen Auslegungs-Massenstrom von 12.5 kg/(hm²).

Insgesamt kann somit ein positives Fazit im Anschluss an die Versuche gezogen werden. Alle benötigten Kennwerte konnten ermittelt werden und stehen für die weiteren Untersuchungen und Auslegungen zur Verfügung. Nur die aktive Kühlung über die aWT konnte zeitbedingt nicht untersucht werden.

¹¹ Die ΔT -Angabe bezieht sich auf die mittlere Rohrtemperatur zum Zeitpunkt des Ausschaltens der aWT und eine Kerntemperatur von 20°C. Die mittlere Kerntemperatur liegt leicht unter der mittleren Rohrtemperatur und die Kerntemperatur nach dem Auskühlen liegt im stationären Zustand bei knapp über 19°C.

Es ist zu beachten, dass die errichteten Feldtestflächen keinen Laborwänden mit reproduzierbaren Randbedingungen entsprechen. Dies führte insbesondere bei den Zeitkonstanten zu Problemen bei der Auswertung der Messungen. Gleichzeitig führen die großen Zeitkonstanten der aWT zu einem sehr großen Zeitbedarf pro Messreihe (~14 Tage pro Messreihe). Somit kann in bestimmten Wetterperioden nur eine begrenzte Anzahl von Messungen durchgeführt werden, da die Start- und Endbedingungen nicht reproduzierbar sind. Auch entspricht die Feldtestfläche der aWT nicht den Anforderungen für Prüfverfahren nach DIN EN 1264-2 (2013). Eine Leistungsprüfung der aWT nach Norm ist mit der umgesetzten Feldtestfläche nicht möglich, die oben erzielten Ergebnisse können trotzdem als charakteristische Kennwerte betrachtet und verwendet werden.

1.5 Erstellung einer aWT-Musterwand

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner „Berufsförderungsverein des baden-württembergischen Stuckateurhandwerks e.V.“ wurde eine Musterwand der außenliegenden Wandtemperierung (aWT) geplant und aufgebaut. Diese wird von dem Projektpartner zu Lehr- und Fortbildungszwecken genutzt, ist jedoch mobil und kann somit auch zu PR- oder Werbezwecken genutzt werden.

1.5.1 Konzept

Auf der Vorderseite der Musterwand wird die praktische Umsetzung (Schichtaufbau) der aWT dargestellt. Auf der Rückseite werden mittels Poster/Fotos die theoretischen Grundlagen der Wandtemperierung aufgeführt. Als Basis für die aWT wurde die standardisierte Belegungsplanung ausgewählt. Zusätzlich wird der optimierte Schichtaufbau mit der Ausklink-Lösung dargestellt. Die Lösung lehnt sich an Ausklinkungen für Blitzschutzleitungen oder andere Leitungen an, unterscheidet sich aber in folgenden Punkten von den oben aufgeführten Varianten und der Umsetzung an der Feldtestfassade:

- Die Kapillarrohrmatten werden weiterhin mit ca. 10 mm Klebemörtel eingeputzt
- Die Stammrohre werden jedoch nicht mehr überputzt, sondern die Wärmedämmung wird an den entsprechenden Stellen ausklinkt. Das bedeutet, dass die Dicke Wärmedämmung an diesen Stellen lokal verringert wird. Eingesetzt wird hierzu ein entsprechendes Schneidwerkzeug, das auf jeder Baustelle zum Zuschritt der Dämmplatten genutzt wird.

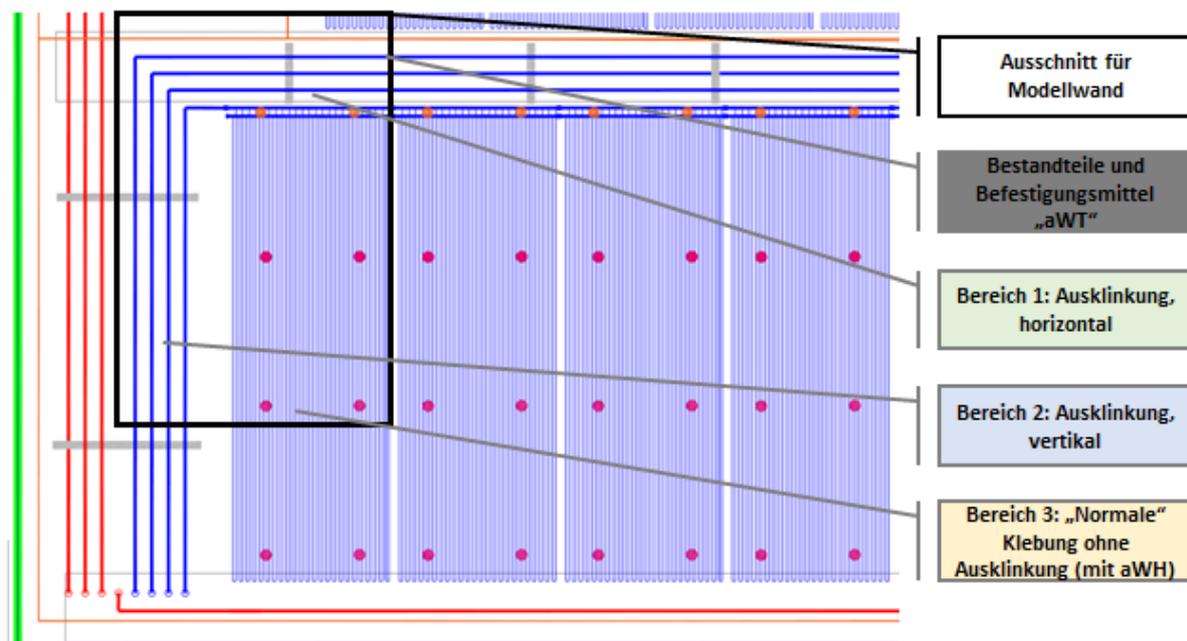


Abbildung 50: Vergrößerter Ausschnitt aus der Belegungsplanung mit Markierung der verschiedenen Bereiche. Der schwarz umrandete Bereich wurde in der Musterwand nachgebildet.

Die Musterwand sollte möglichst viele unterschiedliche Bereiche der Belegungsplanung darstellen. Hierfür wurde sich für einen Ausschnitt im unteren Bereich der standardisierten Belegungsplanung für die Feldtestfassade entschieden. In Abbildung 51 ist die komplette Belegungsplanung für die Feldtestfassade dargestellt. Der schwarz umrandet Ausschnitt ist in Abbildung 50 vergrößert dargestellt.

Die folgenden Bereiche/Themen sollen anhand der Musterwand gargestellt werden:

- Bestandteile und Befestigungsmittel der aWT bzw. des Flächentemperierungssystems:
 - Bestandteile:
 - Stammrohre
 - Kapillarrohrmatten
 - Befestigungsmittel:
 - Kunststoffhaken
 - Kunststoffnagel
 - Kunststoffschiene
- Bereich 1: Ausklinkung im Bereich horizontal verlaufender Stammrohre.
- Bereich 2: Ausklinkung im Bereich vertikal verlaufender Stammrohre.
- Bereich 3: Normale Klebung über den Kapillarrohrmatten ohne Ausklinkung

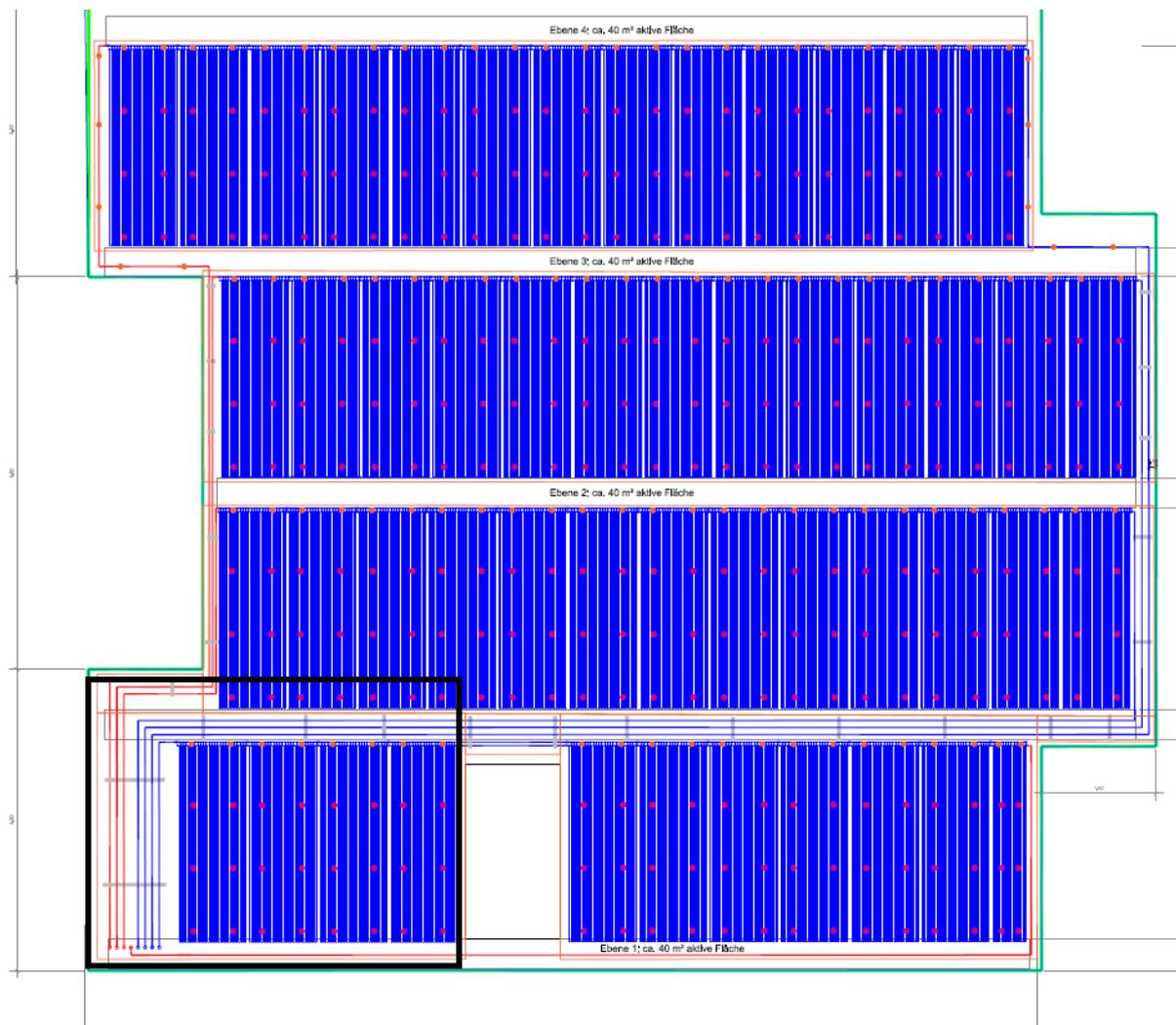


Abbildung 51: Überblick über die standardisierte Belegungsplanung für die Feldtestfassade (Die Belegungsplanung wurde erstellt von: GEFGA Energiesysteme GmbH). In schwarz markiert ist der Ausschnitt, der in Abbildung 50 vergrößert dargestellt ist.

1.5.2 Umsetzung Vorderseite

In *Abbildung 52* ist ein Foto der Vorderseite der Musterwand dargestellt. Die Musterwand ist ca. 1,6 m hoch (ohne Rollen) und ca. 1,8 m breit. Durch die Rollen ist die Wand mobil und kann somit vielfältig genutzt werden.

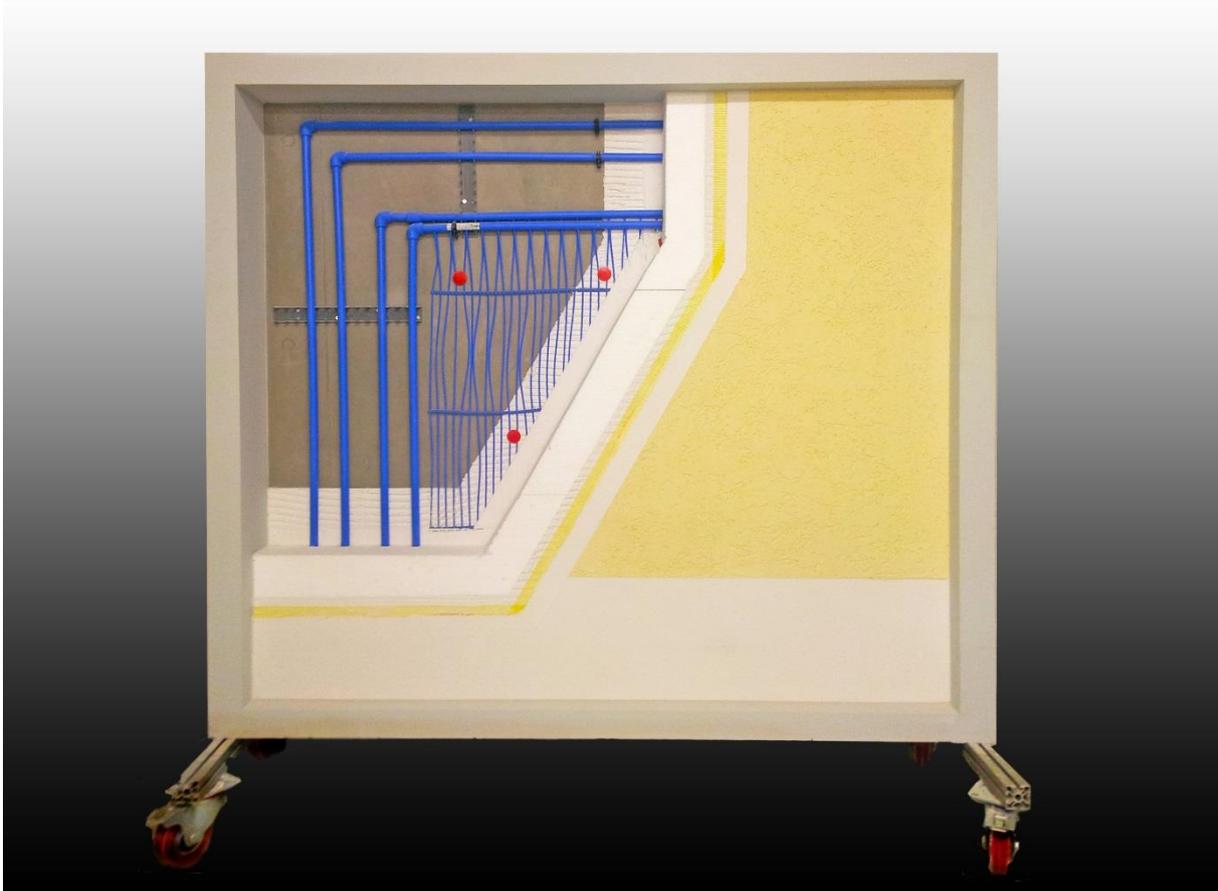


Abbildung 52: Foto der Vorderseite der Musterwand



Abbildung 53: Detailaufnahme der Musterwand mit der Ausklink-Lösung

1.5.3 Umsetzung Rückseite

In *Abbildung 54* ist ein Foto der Rückseite der Musterwand dargestellt. Auf der Rückseite wurden zwei DIN A0-Poster und mehrere DIN A4-Ausdrucke angebracht.

Das linke Poster zeigt die theoretischen Grundlagen der aWT und die wesentlichen Betriebsmodi, siehe auch *Abbildung 55*. Das rechte Poster zeigt die Umsetzung und führt die ermittelten Systemkosten auf, siehe auch *Abbildung 56*.

In den DIN A4-Ausdrucken sind die einzelnen Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT dargestellt, siehe *Abbildung 57* bis *Abbildung 62*

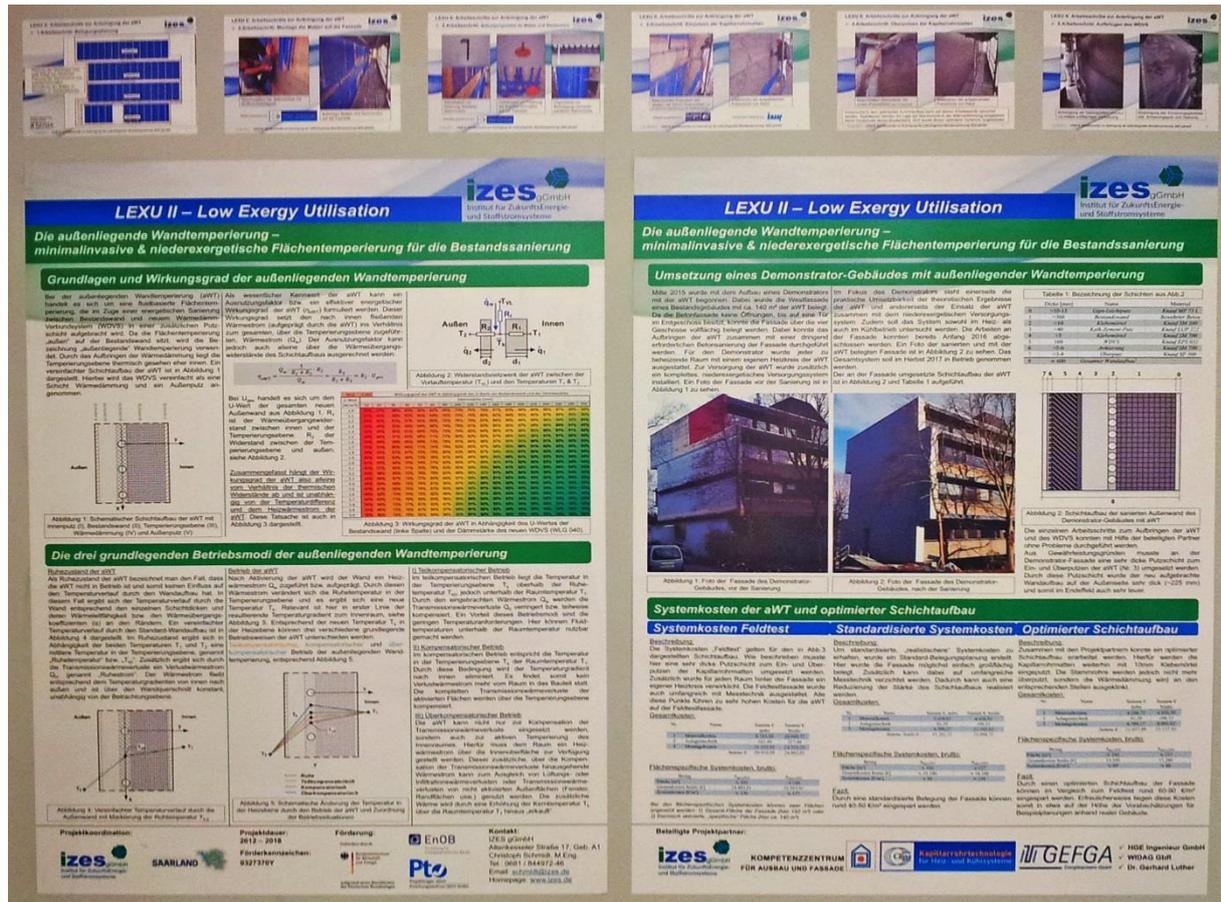


Abbildung 54: Foto der Rückseite der Musterwand

LEXU II – Low Exergy Utilisation

Die außenliegende Wandtemperierung – minimalinvasive & niederexergetische Flächentemperierung für die Bestandssanierung

Grundlagen und Wirkungsgrad der außenliegenden Wandtemperierung

Bei der außenliegenden Wandtemperierung (aWT) handelt es sich um eine fluidbasierte Flächentemperierung, die im Zuge einer energetischen Sanierung zwischen Bestandswand und neuem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) in einer zusätzlichen Putzschicht aufgebracht wird. Da die Flächentemperierung „außen“ auf der Bestandswand sitzt, wird die Bezeichnung „außenliegende“ Wandtemperierung verwendet. Durch das Aufbringen der Wärmedämmung liegt die Temperierungsebene thermisch gesehen eher innen. Ein vereinfachter Schichtaufbau der aWT ist in Abbildung 1 dargestellt. Hierbei wird das WDVS vereinfacht als eine Schicht Wärmedämmung und ein Außenputz angenommen.

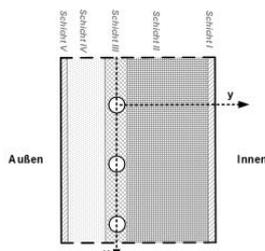


Abbildung 1: Schematischer Schichtaufbau der aWT mit Innenputz (I), Bestandswand (II), Temperierungsebene (III), Wärmedämmung (IV) und Außenputz (V)

Als wesentlicher Kennwert der aWT kann ein Ausnutzungsfaktor bzw. ein effektiver energetischer Wirkungsgrad der aWT (η_{aWT}) formuliert werden. Dieser Wirkungsgrad setzt den nach innen fließenden Wärmestrom (aufgeprägt durch die aWT) ins Verhältnis zum gesamten, über die Temperierungsebene zugeführten, Wärmestrom (Q_w). Der Ausnutzungsfaktor kann jedoch auch alleine über die Wärmeübergangswiderstände des Schichtaufbaus ausgerechnet werden:

$$\eta_{aWT} = \frac{Q_w \cdot \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot R_2}{Q_w} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = R_2 \cdot U_{ges}$$

Bei U_{ges} handelt es sich um den U-Wert der gesamten neuen Außenwand aus Abbildung 1. R_1 ist der Wärmeübergangswiderstand zwischen innen und der Temperierungsebene, R_2 der Widerstand zwischen der Temperierungsebene und außen, siehe Abbildung 2.

Zusammengefasst hängt der Wirkungsgrad der aWT also alleine vom Verhältnis der thermischen Widerstände ab und ist unabhängig von der Temperaturdifferenz und dem Heizwärmestrom der aWT. Diese Tatsache ist auch in Abbildung 3 dargestellt.

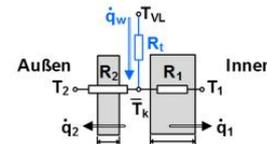


Abbildung 2: Widerstandsnetzwerk der aWT zwischen der Vorlauftemperatur (T_{vl}) und den Temperaturen T_1 & T_2

U-Wert [W/m²K]	Wirkungsgrad der aWT in Abhängigkeit des U-Werts der Bestandswand und der Dämmstärke															
	Dämmstärke [mm]															
1.0	25%	37%	40%	53%	58%	62%	68%	73%	76%	79%	81%	83%	84%	85%	86%	87%
1.1	21%	40%	49%	52%	60%	64%	70%	75%	78%	80%	82%	84%	85%	86%	87%	88%
1.2	26%	42%	51%	52%	60%	62%	68%	72%	76%	79%	81%	83%	84%	85%	86%	87%
1.3	30%	44%	53%	59%	64%	68%	74%	78%	81%	83%	85%	86%	87%	88%	89%	90%
1.4	32%	46%	55%	61%	66%	70%	75%	79%	82%	84%	86%	87%	88%	89%	90%	91%
1.5	34%	48%	57%	63%	68%	71%	77%	80%	83%	85%	87%	88%	89%	90%	91%	92%
1.6	36%	49%	58%	65%	69%	72%	78%	81%	84%	86%	87%	89%	90%	91%	92%	92%
1.7	37%	51%	60%	66%	71%	74%	79%	82%	85%	87%	88%	89%	90%	91%	92%	93%
1.8	38%	52%	61%	67%	72%	75%	80%	83%	86%	87%	89%	90%	91%	92%	93%	94%
1.9	40%	54%	63%	69%	73%	76%	81%	84%	86%	88%	89%	90%	91%	92%	93%	94%
2.0	41%	55%	64%	70%	74%	77%	82%	85%	87%	89%	90%	91%	92%	93%	94%	94%
2.1	42%	57%	65%	71%	75%	78%	83%	85%	88%	89%	90%	91%	92%	93%	94%	95%
2.2	43%	58%	66%	72%	76%	79%	83%	86%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%
2.3	45%	59%	67%	73%	77%	80%	84%	87%	89%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%
2.4	46%	60%	68%	74%	78%	81%	85%	87%	89%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%
2.5	47%	61%	69%	75%	79%	81%	85%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%
2.6	48%	62%	70%	76%	79%	82%	86%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%
2.7	49%	63%	71%	77%	80%	83%	87%	89%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%
2.8	50%	64%	72%	78%	81%	83%	87%	89%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%
2.9	51%	65%	73%	79%	81%	84%	87%	89%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%
3.0	52%	66%	74%	79%	82%	84%	88%	90%	91%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	95%

Abbildung 3: Wirkungsgrad der aWT in Abhängigkeit des U-Werts der Bestandswand (linke Spalte) und der Dämmstärke des neuen WDVS (WLG 040).

Die drei grundlegenden Betriebsmodi der außenliegenden Wandtemperierung

Ruhezustand der aWT

Als Ruhezustand der aWT bezeichnet man den Fall, dass die aWT nicht in Betrieb ist und somit keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf durch den Wandaufbau hat. In diesem Fall ergibt sich der Temperaturverlauf durch die Wand entsprechend den einzelnen Schichtdicken und deren Wärmeleitfähigkeit bzw. den Wärmeübergangskoeffizienten (α) an den Rändern. Ein vereinfachter Temperaturverlauf durch den Standard-Wandaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Im Ruhezustand ergibt sich in Abhängigkeit der beiden Temperaturen T_1 und T_2 eine mittlere Temperatur in der Temperierungsebene, genannt „Ruhetemperatur“ bzw. „ T_{k0} “. Zusätzlich ergibt sich durch die Transmissionswärmeverluste ein Verlustwärmestrom Q_0 , genannt „Ruhestrom“. Der Wärmestrom fließt entsprechend dem Temperaturgradienten von innen nach außen und ist über den Wandquerschnitt konstant, unabhängig von der Betrachtungsebene.

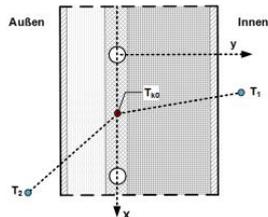


Abbildung 4: Vereinfachter Temperaturverlauf durch die Außenwand mit Markierung der Ruhetemperatur T_{k0}

Betrieb der aWT

Nach Aktivierung der aWT wird der Wand ein Heizwärmestrom Q_w zugeführt bzw. aufgeprägt. Durch diesen Wärmestrom verändert sich die Ruhetemperatur in der Temperierungsebene und es ergibt sich eine neue Temperatur T_k . Relevant ist hier in erster Linie der resultierende Temperaturgradient zum Innenraum, siehe Abbildung 5. Entsprechend der neuen Temperatur T_k in der Heizebene können drei verschiedene grundlegende Betriebsweisen der aWT unterschieden werden:

Teilkompensatorischer, kompensatorischer und überkompensatorischer Betrieb der außenliegenden Wandtemperierung, entsprechend Abbildung 5.

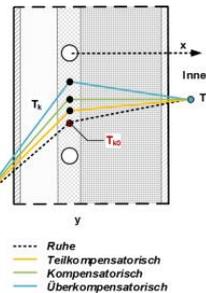


Abbildung 5: Schematische Änderung der Temperatur in der Heizebene durch den Betrieb der aWT und Zuordnung der Betriebsituationen

I) Teilkompensatorischer Betrieb

Im teilkompensatorischen Betrieb liegt die Temperatur in der Temperierungsebene T_k oberhalb der Ruhetemperatur T_{k0} , jedoch unterhalb der Raumtemperatur T_1 . Durch den eingebrachten Wärmestrom Q_w werden die Transmissionswärmeverluste Q_0 verringert bzw. teilweise kompensiert. Ein Vorteil dieses Betriebsmodi sind die geringen Temperaturanforderungen. Hier können Fluidtemperaturen unterhalb der Raumtemperatur nutzbar gemacht werden.

II) Kompensatorischer Betrieb

Im kompensatorischen Betrieb entspricht die Temperatur in der Temperierungsebene T_k der Raumtemperatur T_1 . Durch diese Bedingung wird der Temperaturgradient nach innen eliminiert. Es findet somit kein Verlustwärmestrom mehr vom Raum in das Bauteil statt. Die kompletten Transmissionswärmeverluste der aktivierten Flächen werden über die Temperierungsebene kompensiert.

III) 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 Wärmestrom kann zum Ausgleich von Lüftungs- oder Infiltrationswärmeverlusten oder Transmissionswärmeverlusten von nicht aktivierten Außenflächen (Fenster, Randflächen usw.) genutzt werden. Die zusätzliche Wärme wird durch eine Erhöhung der Kerntemperatur T_k über die Raumtemperatur T_1 hinaus „erkauft“.

Projektkoordination:



SAARLAND



Projektdauer:
2012 – 2018

Förderkennzeichen:
0327370Y

Förderung:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschung für
Energieeffizientes Bauen



Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

Kontakt:

IZES gGmbH
Altenkesseler Straße 17, Geb. A1
Christoph Schmidt, M.Eng.
Tel.: 0681 / 844972-46
Email: schmidt@izes.de
Homepage: www.izes.de

LEXU II – Low Exergy Utilisation

Die außenliegende Wandtemperierung – minimalinvasive & niederexergetische Flächentemperierung für die Bestandssanierung

Umsetzung eines Demonstrator-Gebäudes mit außenliegender Wandtemperierung

Mitte 2015 wurde mit dem Aufbau eines Demonstrators mit der aWT begonnen. Dabei wurde die Westfassade eines Bestandsgebäudes mit ca. 140 m² der aWT belegt. Da die Betonfassade keine Öffnungen, bis auf eine Tür im Erdgeschoss besitzt, konnte die Fassade über die vier Geschosse vollflächig belegt werden. Dabei konnte das Aufbringen der aWT zusammen mit einer dringend erforderlichen Betonsanierung der Fassade durchgeführt werden. Für den Demonstrator wurde jeder zu beheizende Raum mit einem eigenen Heizkreis der aWT ausgestattet. Zur Versorgung der aWT wurde zusätzlich ein komplettes, niederexergetisches Versorgungssystem installiert. Ein Foto der Fassade vor der Sanierung ist in Abbildung 1 zu sehen.



Abbildung 1: Foto der Fassade des Demonstrator-Gebäudes, vor der Sanierung

Im Fokus des Demonstrators steht einerseits die praktische Umsetzbarkeit der theoretischen Ergebnisse der aWT und andererseits der Einsatz der aWT zusammen mit dem niederexergetischen Versorgungssystem. Zudem soll das System sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb untersucht werden. Die Arbeiten an der Fassade konnten bereits Anfang 2016 abgeschlossen werden. Ein Foto der sanierten und mit der aWT belegten Fassade ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Gesamtsystem soll im Herbst 2017 in Betrieb genommen werden.

Der an der Fassade umgesetzte Schichtaufbau der aWT ist in Abbildung 2 und Tabelle 1 aufgeführt.



Abbildung 2: Foto der Fassade des Demonstrator-Gebäudes, nach der Sanierung

Tabelle 1: Bezeichnung der Schichten aus Abb.2

Dicke [mm]	Name	Material
0	≈10-15 Gips-Leichtputz	Knauf MP 75 L
1	≈360 Bestandswand	Bewehrter Beton
2	≈10 Klebemörtel	Knauf SM 300
3	≈40 Kalk-Zement-Putz	Knauf LUP 222
4	≈5 Klebemörtel	Knauf SM 700
5	160 WDVS	Knauf EPS 032
6	≈5-6 Armierung	Knauf SM 700
7	≈3-4 Oberputz	Knauf SP 360
8	≈ 600 Gesamter Wandaufbau	

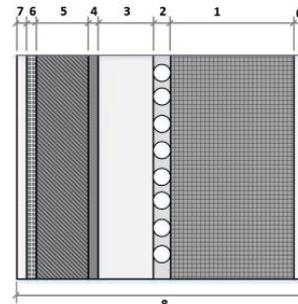


Abbildung 2: Schichtaufbau der sanierten Außenwand des Demonstrator-Gebäudes mit aWT

Die einzelnen Arbeitsschritte zum Aufbringen der aWT und des WDVS konnten mit Hilfe der beteiligten Partner ohne Probleme durchgeführt werden.

Aus Gewährleistungsgründen musste an der Demonstrator-Fassade eine sehr dicke Putzschicht zum Ein- und Überputzen der aWT (Nr. 3) umgesetzt werden. Durch diese Putzschicht wurde der neu aufgetragte Wandaufbau auf der Außenseite sehr dick (-225 mm) und somit im Endeffekt auch sehr teuer.

Systemkosten der aWT und optimierter Schichtaufbau

Systemkosten Feldtest

Beschreibung:

Die Systemkosten „Feldtest“ gelten für den in Abb.3 dargestellten Schichtaufbau. Wie beschrieben musste hier eine sehr dicke Putzschicht zum Ein- und Überputzen der Kapillarrohrrahmen umgesetzt werden. Zusätzlich wurde für jeden Raum hinter der Fassade ein eigener Heizkreis verwirklicht. Die Feldtestfassade wurde auch umfangreich mit Messtechnik ausgestattet. Alle diese Punkte führen zu sehr hohen Kosten für die aWT auf der Feldtestfassade.

Gesamtkosten:

Nr.	Name	Summe € netto	Summe € brutto
1	Materialkosten	9.193,88	10.940,72
2	Anlagentechnik	182,40	217,06
3	Montagekosten	11.333,81	13.725,23
Summe €		20.910,09	24.883,01

Flächenspezifische Systemkosten, brutto:

Bezug	A _{gesamt}	A _{spezifisch}
Fläche [m ²]	≈ 192	≈ 140
Gesamtkosten brutto [€]	24.883,01	24.883,01
Systemkosten [€/m ²]	≈ 130	≈ 177

Bei den flächenspezifischen Systemkosten können zwei Flächen angesetzt werden: 1) Gesamt-Fläche der Fassade (hier 192 m²) oder 2) thermisch aktivierte, „spezifische“ Fläche (hier ca. 140 m²).

Standardisierte Systemkosten

Beschreibung:

Um standardisierte, „realistischere“ Systemkosten zu erhalten, wurde ein Standard-Belegungsplan erstellt. Hier wurde die Fassade möglichst einfach großflächig belegt. Zusätzlich kann dabei auf umfangreiche Messtechnik verzichtet werden. Dadurch kann auch eine Reduzierung der Stärke des Schichtaufbaus realisiert werden.

Gesamtkosten:

Nr.	Name	Summe € netto	Summe € brutto
1	Materialkosten	3.410,85	6.428,92
2	Anlagentechnik	91,20	108,53
3	Montagekosten	9.700,27	11.543,82
Summe, brutto €		13.202,32	18.081,27

Flächenspezifische Systemkosten, brutto:

Bezug	A _{gesamt}	A _{spezifisch}
Fläche [m ²]	≈ 192	≈ 137
Gesamtkosten brutto [€]	≈ 18.100	≈ 18.100
Systemkosten [€/m ²]	≈ 95	≈ 116

Fazit:

Durch eine standardisierte Belegung der Fassade können rund 40-50 €/m² eingespart werden.

Optimierter Schichtaufbau

Beschreibung:

Zusammen mit den Projektpartnern konnte ein optimierter Schichtaufbau erarbeitet werden. Hierfür wurde die Kapillarrohrrahmen weiterhin mit 10mm Klebemörtel eingeputzt. Die Stammrohre werden jedoch nicht mehr überputzt, sondern die Wärmedämmung wird an den entsprechenden Stellen ausgeklippt.

Gesamtkosten:

Nr.	Name	Summe € netto	Summe € brutto
1	Materialkosten	4.166,71	4.958,39
2	Anlagentechnik	91,20	108,53
3	Montagekosten	6.799,17	8.091,01
Summe €		11.057,09	13.157,93

Flächenspezifische Systemkosten, brutto:

Bezug	A _{gesamt}	A _{spezifisch}
Fläche [m ²]	≈ 192	≈ 137
Gesamtkosten brutto [€]	13.200	13.200
Systemkosten [€/m ²]	≈ 69	≈ 84

Fazit:

Durch einen optimierten Schichtaufbau der Fassade können im Vergleich zum Feldtest rund 60-90 €/m² eingespart werden. Erfreulicherweise liegen diese Kosten somit in etwa auf der Höhe der Vorabschätzungen für Beispielplanungen anhand realer Gebäude.

Beteiligte Projektpartner:



KOMPETENZZENTRUM
FÜR AUSBAU UND FASSADE



Kapillarrohrtechnologie
für Heiz- und Kühlsysteme

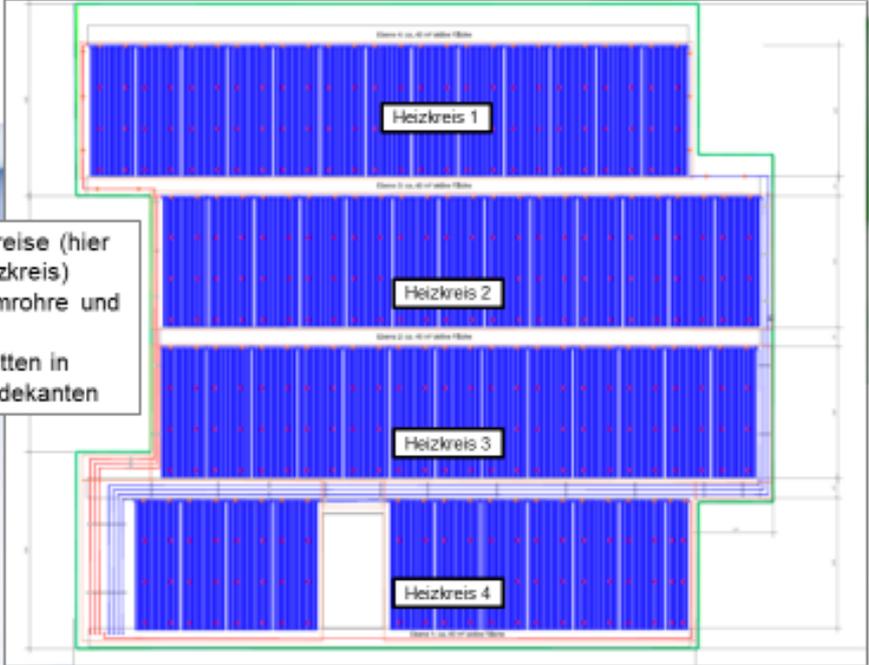


✓ HGE Ingenieur GmbH
✓ WIDAG GbR
✓ Dr. Gerhard Luther

Abbildung 56: Rechtes Poster auf der Rückseite der Musterwand mit der praktischen Umsetzung der aWT und den ermittelten Systemkosten für die verschiedenen Varianten

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ 1. Arbeitsschritt: Belegungsplanung



- Planung der Heizkreise (hier jede Etage ein Heizkreis)
- Planung der Stammrohre und Kapillarrohrmatten
- Bemaßung der Matten in Relation zu Gebäudekanten

Belegungsplanung erstellt durch:
GEFGA
Energiegenossenschaft

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 1

izes gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme

Abbildung 57: 1. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ 2. Arbeitsschritt: Montage der Matten auf der Fassade



Verschweißen der Stammrohre mit Muffenschweißgerät

Befestigte Matten und Stammrohre auf der Fassade

Kapillarrohrmatten von: **Clima** Kapillarrohrtechnologie für Heiz- und Kühlsysteme

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 2

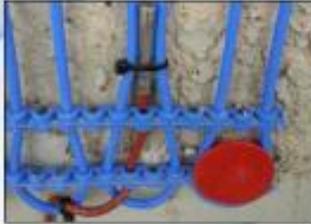
izes gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme

Abbildung 58: 2. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ 2. Arbeitsschritt: Befestigungsmittel für Matten und Stammrohre



		
		
Dübelhaken zur Fixierung einzelner Stammrohre	Dübelnagel zur Fixierung der Kapillarrohmmatten auf der Fassade	Clipschiene zur Befestigung mehrerer paralleler Stammrohre

Befestigungsmaterial von: 

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 3

Abbildung 59: 2. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ 3. Arbeitsschritt: Einputzen der Kapillarrohmmatten



	
Maschinelles Einputzen der Matten mit 10mm Klebemörtel (zur thermischen Anbindung an die Bestandswand)	Glattziehen der aufgetragenen Putzschicht von Hand

Arbeiten ausgeführt von: 

Verwendetes Material von: 

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 4

Abbildung 60: 3. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ **4. Arbeitsschritt: Überputzen der Kapillarrohrmatten**

izes gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme



Maschinelles Überputzen der ersten Putzschicht (nach Trocknung)

Glattziehen der aufgetragenen Putzschicht von Hand

Entsprechend dem optimierten Schichtaufbau kann auf diesen Arbeitsschritt verzichtet werden. Stattdessen werden die Lage der Stammrohre in der Wärmedämmung ausgeklinkt. Siehe Vorderseite dieser Musterwand. Dort wurde dieses optimierte Verfahren angewendet.

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 5

Abbildung 61: 4. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

➤ **5. Arbeitsschritt: Aufbringen des WDVS**

izes gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme



Anbringung der Dämmplatten (EPS WL6 035) mittels vollflächiger Verklebung.

Einbringung des Armierungsgewebes inkl. Armierungsputz und Oberputz.

25.07.2017 LEXU II: Arbeitsschritte zur Anbringung der außenliegenden Wandtemperierung; IZES gGmbH 6

Abbildung 62: 5. Arbeitsschritte zur Anbringung der aWT

1.6 Versuche an der aLT-Feldtestfläche

Die Versuche an der aLT-Feldtestfläche können Hähn (2019) im Anhang entnommen werden.

1.7 Modellierung und Validierung der aWT und aLT

Die Modellierung der aWT und aLT kann Schmidt (2019) im Anhang entnommen werden. Speziell für die aLT wird die Modellierung und Validierung auch nochmal in Hähn (2019) im Anhang dargestellt.

1.7.1 Fazit „Modellvalidierung“

Durch den Vergleich zwischen Simulation und Messung können alle aufgestellten Modelle für die aWT und die aLT validiert werden. Bei der aLT beruht die Validierung bisher auf den Ergebnissen der Laborwand, die Validierung anhand der Ergebnisse von der Feldtestfläche ist noch ausstehend. Bezogen auf die aWT eignet sich HEAT für Untersuchungen auf Bauteilebene und TRNSYS für instationäre Gebäude- und Systemsimulation. Für die aLT konnten zwei TRNSYS-Modelle anhand der Messungen an der Laborwand validiert werden. Somit steht für die folgenden Gebäudesimulationen sowohl für die aWT als auch für die aLT jeweils mindestens ein validiertes TRNSYS-Modell zur Verfügung.

Gleichzeitig wurden im Rahmen der Bearbeitung auch die Grenzen der Validierung aufgezeigt. Der Vergleich von Messdaten einer realen, allen Umgebungsbedingungen ausgesetzten, Fassade mit Simulationen kann als eine solche Grenze betrachtet werden. Je nach Detaillierungsgrad kann eine Validierung hier unendlich schwierig gestaltet werden, da eine entsprechend große Zahl an Umgebungsbedingungen mit geeigneter Messtechnik aufgenommen und ausgewertet werden muss.

1.8 Gebäudesimulation

Das folgende Kapitel ist aus Schmidt (2019) entnommen.

Auf Grundlage der validierten Simulationsmodelle können abschließend Simulationsstudien anhand von Referenzgebäuden durchgeführt werden. Ziel der Simulationen ist es die Potentiale der Komponenten einzeln und in Kombination aufzuzeigen, unter Beantwortung der folgenden grundsätzlichen Frage:

- Welche Deckungsanteile sind für die drei generellen Betriebsmodi (teilkompensatorisch, kompensatorisch und überkompensatorisch) erreichbar?
- Ist eine alleinige Temperierung des Gebäudes über die Komponenten (aWT & aLT), unter Verwendung von einfachen Regelstrategien, erreichbar (monovalenter Einsatz)?
- Welche zusätzlichen Verluste/Mehraufwand tritt durch den Betrieb der aWT/aLT auf?
- Welcher Pumpenstrombedarf (Heizkreispumpe) steht dem thermischen Nutzen gegenüber?
- Wie verändern sich Raum- und Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenz-Variante?

Ein zentraler Punkt der Untersuchungen, vor allen in Bezug auf die aWT, ist die Unterteilung in einen monovalenten Betrieb, also die Übernahme der Funktion einer Flächentemperierung, und in einen bivalenten Betrieb, als eine Art Bauteilaktivierung. Im monovalenten Betrieb ist die Komponente (aWT und/oder aLT) die einzige Heizung und muss dementsprechend Grundlastbetrieb und Spitzenlastbetrieb übernehmen. Beim bivalenten Ansatz steht ein zweites (ggfs. innenliegendes) Heizsystem zur Verfügung, welches einen Rest-Heizwärmebedarf oder eine Spitzenlast abdecken kann. Die Komponente (aWT und/oder aLT) kann damit im Grundlastbetrieb verbleiben. Da hier eine Vielzahl von Kombinationen möglich sind (Flächenanteile aWT und aLT...), können nur einige Fälle stellvertretend betrachtet werden.

1.8.1 Referenzgebäude

Die Komponenten aWT und aLT werden einzeln und in Kombination anhand des Referenzgebäudes aus der IEA SHC Task 44, siehe Dott et al. (2013) simuliert. Der Vorteil der Simulation anhand des Gebäudedatensatzes aus der Task ist, dass für das Gebäude bereits gemeinsame Randbedingungen definiert wurden. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse, die im Rahmen der Simulationen an dem Referenzgebäude ermittelt werden, kein Resultat variierender oder falscher Randbedingungen sind. Die Randbedingungen für das Referenzgebäude enthalten u.a. Bauteilbeschreibungen, Wetterdaten, Profile für interne Gewinne durch Personen und Geräte und alle weiteren wichtigen Gebäude-Parameter. Die detaillierte Beschreibung der Randbedingungen und des Gebäudes kann den Dokumenten der IEA SHC Task 44¹², siehe unter anderem Dott et al. (2013) und Haller et al. (2013) entnommen werden.

Die Beschreibung des Referenzgebäudes innerhalb der IEA Task ist in zwei Teile untergliedert. Im ersten Teil, Part A, siehe Haller et al. (2013), werden die allgemeinen Randbedingungen des Gebäudes aufgeführt, darunter fallen u.a. Wetterdatensätze und der Wärmebedarf des Referenzgebäudes (je nach Standort). Für die Gebäudesimulation werden nur die Gebäude-Datei und die notwendige Peripherie verwendet, ohne die weitere Anlagentechnik. Im zweiten Teil der Beschreibung des Referenzgebäudes, siehe Dott et al. (2013), wird das Gebäude an sich detailliert beschrieben. Da das Gebäude Kernpunkt der Simulationen mit aWT und aLT ist, sollen der Aufbau und die Randbedingungen im folgenden Kapitel kurz dargestellt werden.

1.8.1.1 Aufbau und Struktur des Referenzgebäudes

Eine Skizze des Referenzgebäudes ist in Abbildung 63 dargestellt. Allgemein handelt es sich bei dem Gebäude um einen zweigeschossigen Bau mit einer Nutzfläche von 140 m² und einem Luftvolumen von ca. 390 m³. Das Gebäude wird in TRNSYS als eine einzige Zone mit einer großen inneren Wand, die stellvertretend für die einzelnen inneren Wände (Raumtrennwände und Geschosstrennwände) steht, simuliert. Der Aufbau der thermischen Hülle des Gebäudes variiert, je nach dem energetischen Standard, der betrachtet werden soll, siehe Details in Kapitel 1.8.1.3.

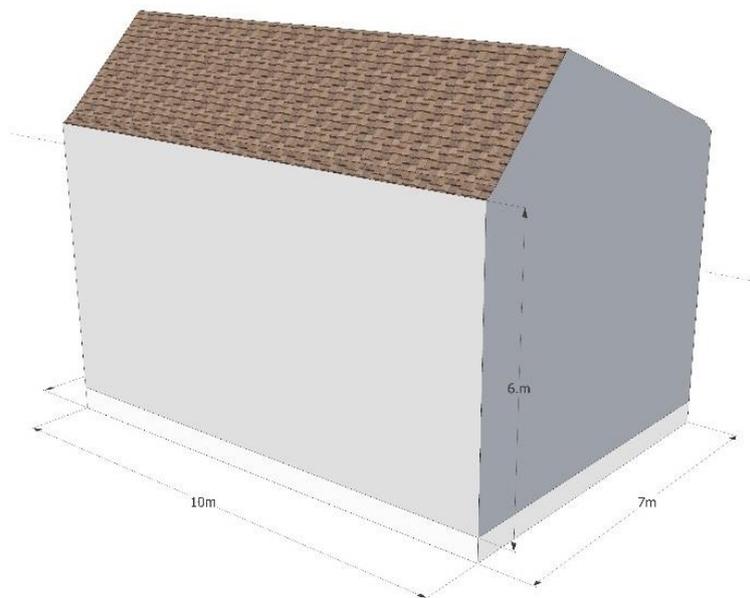


Abbildung 63: 3D-Skizze des Gebäudes auf Grundlage der Innenmaße für die Eingabe in TRNSYS. Im Vordergrund erkennbar sind die Süd-Fassade und die Ost-Fassade

¹² Siehe <http://task44.iea-shc.org/> (abgerufen am 23.10.2019)

1.8.1.2 Ermittlung der Belegungsfläche der aWT

Die Brutto-Wandflächen des Gebäudes (auf Grundlage der Innenmaße) sind in *Abbildung 64* dargestellt. Das Gebäude hat eine gesamte Wandfläche/Fassadenfläche von rund 217 m², jeweils 60 m² auf der Nord- und Südseite und jeweils 48,5 m² auf der West- und Ostseite. Für die Ermittlung der Belegungsfläche der aWT wurde die Lage der Fenster entsprechend *Abbildung 64* definiert. Das Gebäude wurde maximal möglich mit der aWT belegt.

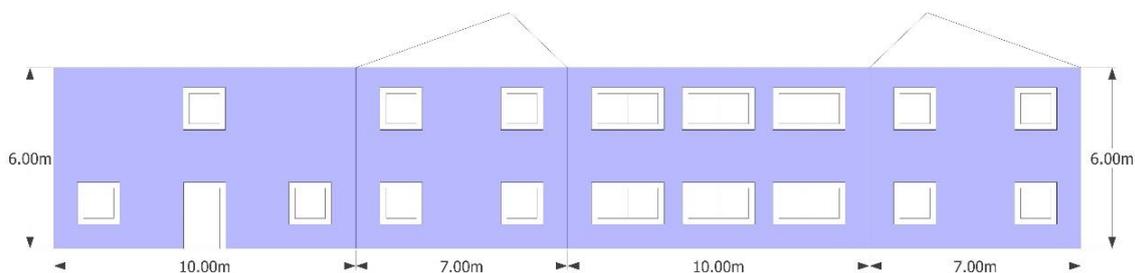


Abbildung 64: Faltdiagramm der 3D-Skizze mit Fenstern (Lage der Fenster auf der Fassade frei gewählt, Anzahl und Größe der Fenster sind über die IEA-Task festgelegt. Mit Visualisierung der Belegungsfläche der aWT (blau)

Insgesamt wird das Gebäude bei der maximalen Belegungsvariante mit rund 156 m² der aWT ausgestattet. Dies entspricht eine Belegungsrate von ca. 81 % (bezogen auf die Netto-Fassadenfläche), respektive ca. 72% (bezogen auf die Brutto-Fassadenfläche). Bei den verbleibenden Flächen handelt es sich um einen Sicherheitsabstand um die Fenster(laibungen). Bei der Ost- und Westfassade sind zusätzlich noch kleinere Flächen im Dachbereich (Schräge) unbelegt.

1.8.1.3 Gebäude-Varianten

In Anlehnung an die Vorgehensweise in der Task werden mehrere Gebäude-Varianten, stellvertretend für verschiedene energetische Qualitäten des Gebäudes (~ Sanierungsgrade), untersucht. Allen Varianten gemeinsam ist der Schichtaufbau der thermisch aktivierten Außenwand. Bei dem Schichtaufbau handelt es sich um eine Kombination aus der Außenwand aus der Task, siehe Dott et al. (2013), und dem umgesetzten Schichtaufbau der Feldtestfassade entsprechend Tabelle 9. Dabei wird der neue Aufbau (Kapillarrohrmatten, Putz und WDVS) von der Feldtestfassade übernommen und für die Bestandswand ein Mauerwerk aus Ziegeln, entsprechend der Task und typischer für Bestandsgebäude (v.a. Wohngebäude) angesetzt.

Der U-Wert der Außenwand, berechnet nach EN ISO 6946:2007, liegt bei rund 0.18 W/(m²K), siehe *Tabelle 25*. Durch den Schichtaufbau ergibt sich ein stationärer Wirkungsgrad der aWT von rund 91% (genau 91.44%). Der U-Wert der unsanierten Bestandswand liegt bei rund 1.95 W/(m²K). Auch die weiteren Bauteile des Gebäudes wurden an einen Altbau angepasst (Dach- und Bodenaufbau), siehe *Tabelle 25*.

Die verschiedenen Gebäude-Varianten werden über den spezifischen Heizwärmebedarf in kWh/(m²a) definiert. Dabei wird die Nomenklatur aus der Task übernommen, dementsprechend werden die Varianten mit SFH (*single family house*) und anschließend dem gerundeten spezifischen Heizwärmebedarf in kWh/(m²a) benannt. Die folgenden drei Varianten wurden ausgewählt:

- **SFH15:** Repräsentiert ein Bestandsgebäude, das auf die Größenordnung „Passivhaus“ saniert wird.
- **SFH45:** Repräsentiert ein Bestandsgebäude, das auf die Größenordnung „aktueller Neubau“ saniert wird.
- **SFH75:** Repräsentiert ein teilsaniertes Bestandsgebäude, mit einem etwas höheren Heizwärmebedarf.

Die U-Werte der einzelnen Bauteile der Gebäude können Tabelle 25 entnommen werden. Mit besserer energetischer Qualität des Gebäudes sinkt die Heizgrenztemperatur und damit im Endeffekt auch die Länge der Heizperiode für die Gebäude-Variante, siehe Tabelle 26.

Tabelle 25: U-Werte der Bauteile der Gebäude (nur thermische Hülle dargestellt)

Bauteil	U-Wert [W/(m ² K)]		
	SFH15	SFH45	SFH75
Außenwand	0.18	0.18	0.18
Bodenplatte	0.14	0.37	0.80
Dach	0.16	0.25	0.83
Fenster ¹³	0.60	1.40	2.80

Tabelle 26: Heizgrenztemperatur und resultierende Länge der Heizperiode pro Jahr der Gebäude

Gebäude	Heizgrenztemperatur [°C]	Länge der Heizperiode [h]
SFH15	12	4749
SFH45	14	5397
SFH75	15	5804

1.8.1.4 Referenzergebnisse

In *Tabelle 27* sind die Energiebilanzen der Referenzgebäudes (Wandtemperierung deaktiviert) dargestellt. Die geringe Abweichung in der Energiebilanz resultiert aus dem Berechnungsweg und der Summation der TRNSYS-Outputs. Der spezifische Heizwärmebedarf (ideale Heizung) der Varianten liegt zwischen 17 und 76 kWh/m².

Tabelle 27: Jahres-Energiebilanz der Referenz-Varianten, Wandtemperierung deaktiviert

Gewinne [kWh]	SFH15	SFH45	SFH75	Verluste	SFH15	SFH45	SFH75
Solare Gewinne	2912	4029	5163	Transmission	5538	8154	13849
Interne Gewinne	1697	1935	2078	Lüftung/Infiltration	1526	4002	4096
Ideale Heizung	2409	6138	10603				
Gesamt	7018	12101	17844	Gesamt	7064	12155	17946
$q_{H,ih}$ [kWh/m ²]	17	44	76				

In *Tabelle 28* ist zu erkennen, dass die Heizlast von SFH15 bei ca. 2 kW liegt, bei SFH45 bei rund 4 kW und bei SFH75 bei rund 6 kW. Die Heizlast kann auch auf die Grundfläche des Gebäudes [W/m²] und auf die thermisch aktivierte Fassadenfläche umgelegt werden [W/m²]. Da für das Referenzgebäude die Grundfläche (140 m²) und die thermisch aktivierte Fassadenfläche (156 m²) sehr ähnlich sind, ergeben sich hier nahezu identische Werte.

Tabelle 28: Berechnung der spezifischen Heizlast der Varianten (ohne interne Gewinne); keine Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

Variante	Heizlast [kW]	Spez. Heizlast [W/m ²]	A_{Geb}	Spez. Heizlast [W/m ²]	A_{aWT}
SFH15	2.2	16		14	
SFH45	4.1	29		26	
SFH75	6.2	44		40	

Betrachtet man sich die Anteile der einzelnen Bauteile an den Wärmeverlusten der Gebäude in *Abbildung 65*, so erkennt man, dass der Anteil der Transmissionswärmeverluste der belegten und damit thermisch aktivierten Fassadenflächen an den gesamten Wärmeverlusten von SFH15 zu SFH75 von 27 % auf 10 % zurückgeht.

¹³ Berechneter U-Wert der Fenster aus Glas- und Rahmenanteil

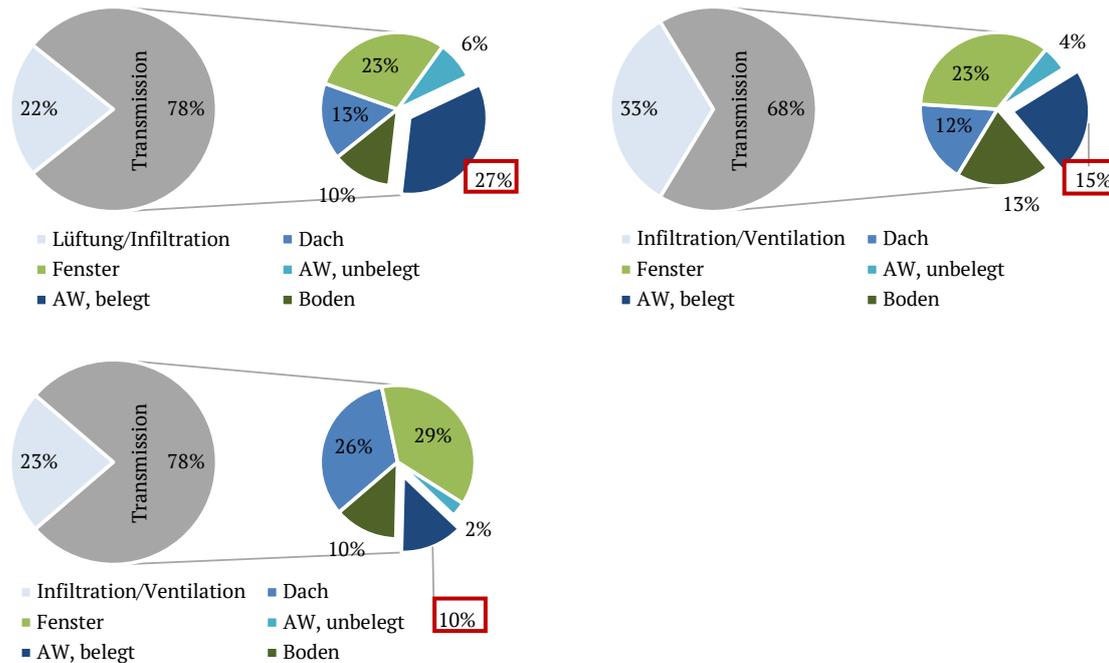


Abbildung 65: Aufteilung der Wärmeverluste des Gebäudes und Aufspaltung der Transmissions-wärmeverluste in die Bauteile für SFH15 (oben links), SFH45 (oben rechts) und SFH75 (unten links)

1.8.2 Kennwerte und Bewertungsgrößen für die dynamische Simulation

Neben den stationären Kennwerten werden für die dynamischen Simulationen weitere Kennwerte und Bewertungsgrößen definiert. Für die aLT werden die Kennwerte um die entsprechenden Auswertegrößen erweitert bzw. ergänzt.

1.8.2.1 Jährlicher Wirkungsgrad (energetischer, dynamischer)

Die Ermittlung des Wirkungsgrades über die U-Werte kann nur für den stationären Fall angesetzt werden, da instationäre Vorgänge (Ein- und Ausspeichereffekte, Temperaturerhöhungen im Raum, Änderung der Wärmeübergangskoeffizienten usw.) das Ergebnis verfälschen können. Für die Simulation wird der Wirkungsgrad daher auf Grundlage von Stunden- bzw. Jahresbilanzen und im Vergleich zu einer Ausgangsvariante (aWT deaktiviert) erstellt. Dabei wird die Änderung der Nutzwärme (Q_1) von der Ausgangsvariante zu der simulierten Variante auf die insgesamt durch die aWT zugeführte Wärmemenge bezogen. Beide Wirkungsgrade sind somit gleich definiert, werden aber unterschiedlich berechnet.

$$\eta_{aWT,dyn} = \frac{Q_{w,1}}{Q_w} = \frac{(Q_{1,ref} - Q_{1,n}) \cdot -1}{Q_w} \cdot 100 [\%] \quad (54)$$

Mit:

- $Q_{1,n}$ Wärmemenge durch die Außenwand der simulierten Variante, mit aWT (kWh)
- $Q_{1,ref}$ Wärmemenge durch die Außenwand der Ausgangsvariante [kWh], ohne aWT (\dot{Q}_0)
- Q_w Wärmemenge von der Wandtemperierung in die Außenwand gesamt [kWh]

1.8.2.2 Jährlicher Nutzungsgrad ε_{aWT}

Neben dem Wirkungsgrad wird noch ein Nutzungsgrad (ε) eingeführt, da der Einsatz der sehr trägen aWT zu Übertemperaturen im Raum führen kann (im Vergleich zur Referenzvariante). Der Nutzungsgrad beziffert, wie viel der über die aWT eingebrachten Wärme (Q_w) verwendet wird, um den Wärmebedarf des Raumes zu verringern ($\Delta Q_{H, Bestand}$). Darüber hinaus dem Raum zugeführte Wärme führt zu einer Übertemperierung des Raumes und somit wiederum zu höheren Verlusten. Zugleich sind auch die Verluste über den Wirkungsgrad der aWT in dem Nutzungsgrad enthalten.

$$\varepsilon_{aWT} = \frac{\Delta Q_{H, Bestand}}{Q_w} = \frac{Q_{H, iH, ref} - Q_{H, iH, n}}{Q_w} \cdot 100 [\%] \quad (55)$$

Mit:

- $Q_{H, iH, ref}$ Heizwärmebedarf des idealen Heizsystems der Referenz-Variante, ohne aWT [kWh]
- $Q_{H, iH, n}$ Heizwärmebedarf des idealen Heizsystems der simulierten Variante, mit aWT [kWh]

1.8.2.3 Deckungsanteil δ_{aWT}

Der Deckungsanteil δ zeigt an, welcher Anteil des gesamten Heizwärmebedarfs über die aWT abgedeckt wird.

$$\delta_{aWT} = \frac{Q_w}{Q_{H, iH, ref} + Q_w} \cdot 100 [\%] \quad (56)$$

1.8.2.4 Regelgüte RG_{aWT}

Zur Bewertung der Regelgüte, gerade im monovalenten Betrieb wird eine weitere Bewertungsgröße eingeführt, die Regelgüte der aWT (RG_{aWT}):

$$RG_{aWT} = \frac{\varepsilon_{aWT} \cdot \delta_{aWT}}{\eta_{aWT, dyn} \cdot \delta_{aWT, max}} \cdot 100 [\%] \quad (57)$$

Mit:

- ε_{aWT} Dynamischer Nutzungsgrad der aWT [%]
- δ_{aWT} Deckungsanteil der aWT [%]
- $\eta_{aWT, dyn}$ Dynamischer Wirkungsgrad der aWT [%]
- $\delta_{aWT, max}$ Maximaler Deckungsanteil der aWT [%] (*Standard: 100 %*)

Die Regelgüte lässt sich folgendermaßen beschreiben: Eine ideal geregelte aWT hätte einen Nutzungsgrad gleich dem dynamischen Wirkungsgrad (maximal möglicher Nutzungsgrad) und (je nach monovalentem oder bivalentem Ansatz) einen maximale Deckungsanteil von 100 %. Durch den Bezug des resultierenden Nutzungsgrades und Deckungsanteils auf diesen maximal möglichen Wert, kann die Güte der Variante im Sinne einer Regelgüte mit möglichst hohem Deckungsanteil bewertet werden.

1.8.3 Simulationen mit außenliegender Wandtemperierung

1.8.3.1 Randbedingungen der Simulationen

Generell werden die Randbedingungen der Simulationsumgebung gemäß dem IEA-Referenzgebäude nach Dott et al. (2013) und Haller et al. (2013) angesetzt. Das Heizsystem des Gebäudes wird jedoch geändert, unter Integration der aWT. Ergänzt wird die aWT, bei Bedarf, durch die ideale Heizung in TRNSYS. Bei der idealen Heizung handelt es sich um ein fiktives Heizsystem, das die Temperatur am Ende eines jeden Simulationsschritts auf die eingestellte Soll-Temperatur anhebt, und zwar ohne Leitungsverluste, Trägheit,

Leistungsbegrenzung. Aktiviert wird die Kombination aus aWT und idealer Heizung über die Heizperiode und die Raumtemperatur. Die Ermittlung der Heizperiode erfolgt über die mittlere Außentemperatur über 24 Stunden (T_{amb24}). Erreicht dieser gleitende Mittelwert die Heizgrenztemperatur bzw. unterschreitet diese, wird das Heizsystem aktiviert. Die folgenden drei „einfachen“ Regelabfragen werden eingesetzt:

- Massenstromregelung – Rücklauftemperaturabfrage: Erreicht die Rücklauftemperatur die Vorlauftemperatur, entzieht die aWT dem Gebäude Wärme. Um diese Wärmeentnahme zu verhindern, wird in diesem Fall der Massenstrom deaktiviert (*Hysterese: 0.01 K*).
- Massenstromregelung – Heizperiode: Nur innerhalb der Heizperiode wird der Massenstrom der aWT aktiviert ($T_{amb24} < \text{Heizgrenztemperatur}$).
- Massenstromregelung – Raumtemperatur: Bei einer Raumtemperatur größer der Raum-Solltemperatur (20°C) plus einer Hysterese wird der Massenstrom der aWT ausgeschaltet (*Hysterese 0.5 K*)

Die Simulation der aWT/aLT erfolgt generell ohne Leitungsverluste, es werden bei der Simulation keine Vor- oder Rücklaufleitungen betrachtet, sondern nur die direkte Kapillarrohrmattenfläche.

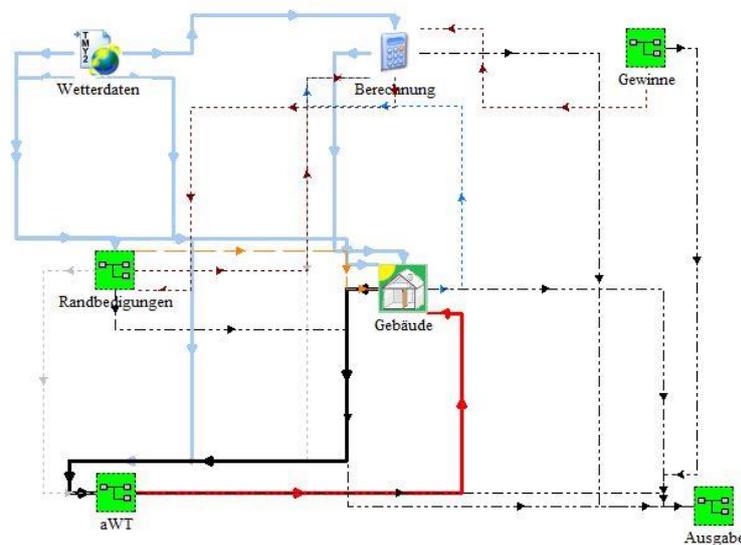


Abbildung 66: Screenshot des Simulation Studios aus TRNSYS für die Simulation der aWT

1.8.3.2 Auswertemethode

Die Auswertung der Ergebnisse der Simulation erfolgt unter verschiedenen Gesichtspunkten. Dabei werden die Simulationsergebnisse auch auf die Ergebnisse der Referenzvariante (ohne aWT) bezogen, um die Änderungen durch den Betrieb der aWT darzustellen:

- Energetische Größen und Laufzeiten: Auswertung der Simulationsergebnisse mit Hilfe der oben definierten Kennwerte.
- Hilfsenergien: Für die aWT ist der Pumpenstrombedarf der Heizkreispumpe eine relevante Hilfsenergie. Über die Näherung der Pumpenleistung pro Quadratmeter thermisch aktivierter Fläche kann die notwendige Pumpenleistung für die Simulation ermittelt werden:

$$P_{HK,aWT} = 0.36 \left[\frac{W}{m^2} \right] * 156 [m^2] = 56 [W] \quad (58)$$

Über die Pumpenleistung und die Laufzeit der aWT kann der Pumpenstrombedarf [kWh/a] als weiterer Kennwert des Betriebs der aWT ermittelt und verglichen werden.

- Komfort / Thermische Behaglichkeit:
Für das Gefühl der Behaglichkeit ist die empfundene Temperatur maßgebend. Diese empfundene Temperatur oder auch operative Temperatur stellt in etwa das

arithmetische Mittel zwischen der Raumlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Umfassungsflächen dar. Nach Pistohl et al. (2013) gibt es einen Bereich, in dem sich der Mensch in einem geschlossenen Raum am wohlsten fühlt, das sogenannte Behaglichkeitsfeld (siehe *Abbildung 67*).

Mathematische Modellierung des Behaglichkeitsfeldes

Das Behaglichkeitsfeld aus *Abbildung 67* kann über einfach lineare Abhängigkeiten auch mathematisch beschrieben werden. Durch die mathematische Modellierung des Behaglichkeitsfeldes kann die Auswertung der Behaglichkeit in Form einer Behaglichkeitsverteilung erfolgen. Dafür wird das Behaglichkeitsfeld in vier verschiedene Bereiche unterteilt und die Bedingungen für die vier Bereiche in Form mathematischer Abhängigkeiten erstellt. Die vier Bereiche sind in *Abbildung 67* zu erkennen: „1) behaglich“, „2) Noch behaglich“, „3) unbehaglich warm“ und „4) unbehaglich kalt“. Es handelt sich hierbei um eine vereinfachte Herangehensweise.

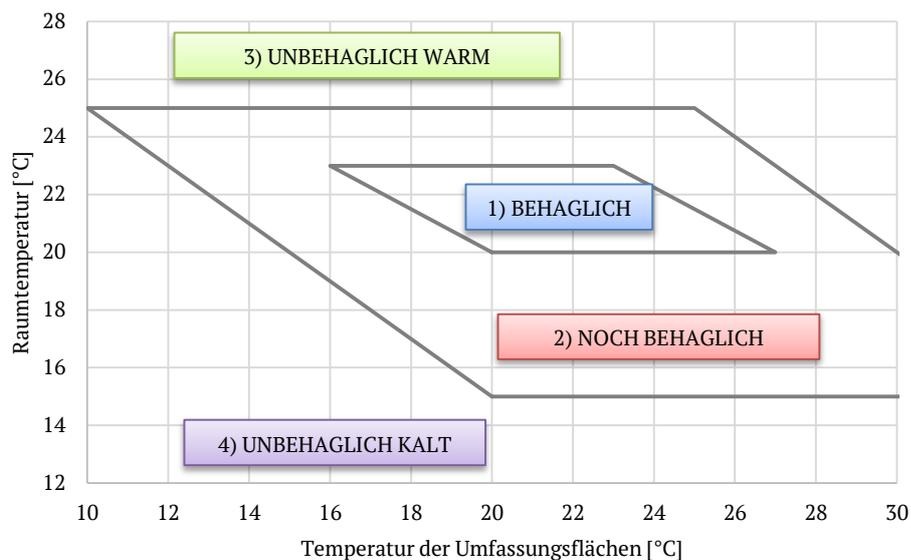


Abbildung 67: Behaglichkeitsfeld für Raumlufttemperatur und Temperatur der Umfassungsflächen; Abbildung erstellt in Anlehnung an Pistohl et al. (2013)

1.8.3.3 Monovalenter Ansatz (Einsatz der aWT als Flächentemperierung)

Beim monovalenten Ansatz soll der komplette Heizwärmebedarf des Gebäudes über die aWT abdeckt werden. Daher werden die Vorlauftemperaturen anhand der Heizlast des Gebäudes definiert, siehe Tabelle 28. Aus der spezifischen Heizlast pro m² belegte Fassadenfläche (ohne den Anteil der belegten Fassadenflächen, da diese im überkompensatorischen Betrieb entfallen) ergeben sich aus Abbildung 40 die notwendigen Vorlauftemperaturen. Diese sind in Abbildung 68 als Kennlinie dargestellt. Zusätzlich sind in Abbildung 68 auch nochmal die unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen der Gebäude zu erkennen. Beim monovalenten Ansatz befindet sich die aWT im überkompensatorischen Betrieb, da nur Vorlauftemperaturen größer der nominellen Raumtemperaturen zum Einsatz kommen. Der überkompensatorische Betrieb ist notwendig, um die Wärmeverluste von unbelegten Flächen, Fenstern und Lüftungswärmeverluste auszugleichen.

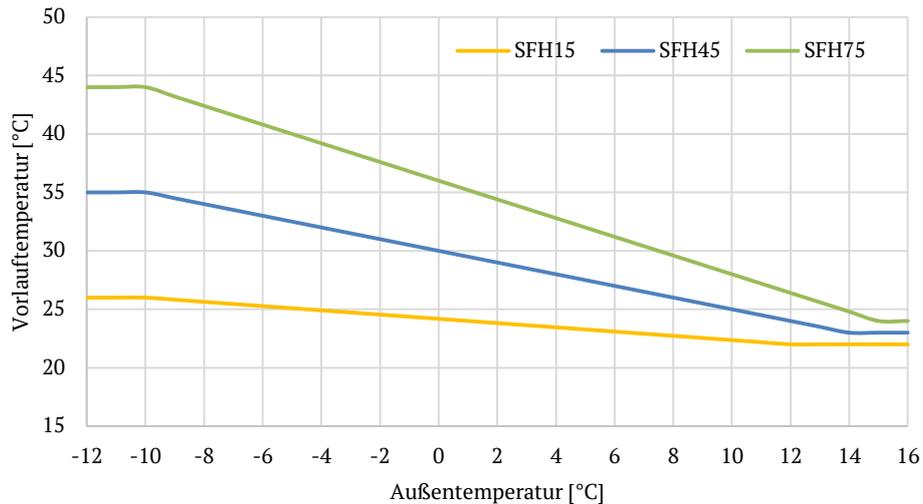


Abbildung 68: Heizkennlinie der aWT, aufgetragen über die mittlere Außentemperatur der letzten 24 h

In Tabelle 29 sind nochmal die Referenzergebnisse der drei Gebäude dargestellt. Aufgeführt sind der Heizwärmebedarf des Gebäudes (ideale Heizung), die mittlere Raum- und die mittlere Oberflächentemperatur über die Heizperiode.

Tabelle 29: Heizwärmebedarf der Referenzvarianten für die drei Gebäude und mittlere Raum- und Oberflächentemperatur über die Heizperiode

Kenner t	Name	Einheit	SFH15 _R ef	SFH45 _R ef	SFH75 _R ef
$Q_{H,iH}$	Heizwärmebedarf	kWh/a	2409	6138	10606
$T_{Raum,av}$	Mittl. Raumtemp.	°C	20.7	20.3	20.3
$T_{SUR,av}$	Mittl. Oberflächentemp.	°C	20.3	20.0	19.4

Simulationsergebnisse

Es erfolgt eine Darstellung der Simulationsergebnisse für den monovalenten Einsatz der aWT, geregelt über eine außentemperaturgeführte Heizkennlinie, entsprechend *Abbildung 68*.

Energetische Größen und Laufzeiten

Die Ergebnisse der Simulation können Tabelle 30 entnommen werden. Der Deckungsgrad der Varianten liegt bei knapp über 99%, es liegt jedoch noch ein rechnerischer Rest-Wärmebedarf von 27 bis 203 kWh/a vor. Der Nutzungsgrad der Varianten liegt zwischen 70 und 76%, der energetische Mehraufwand somit bei rund 24 - 30%. Der dynamisch ermittelte Wirkungsgrad liegt zwischen 86 und 88% und die Regelgüte der einfachen Regelung (Heizkennlinie) für den monovalenten Betrieb bei Werten zwischen 78 und 87%. Beim monovalenten Ansatz sinkt die Regelgüte somit mit der energetischen Qualität bzw. mit höheren Vorlauftemperaturen deutlich. Bezieht man die Laufzeit der aWT (t_{aWT}) auf die Länge der Heizperiode (siehe *Tabelle 26*), so läuft die aWT bei allen drei Varianten nur ca. jede dritte Stunde der Heizperiode.

Tabelle 30: Ergebnisse der monovalenten Variante für alle drei Gebäude

Kennwert	Name	Einheit	SFH15	SFH45	SFH75
$Q_{w,aWT}$	Wärmeeintrag der aWT	kWh/a	3154	8202	14908
t_{aWT}	Laufzeit der aWT	h/a	1532	1853	2139
$Q_{H,iH}$	Rest-Heizwärmebedarf	kWh/a	27	75	203
$\eta_{aWT,dyn}$	Wirkungsgrad der aWT	%	86	88	88
ε_{aWT}	Nutzungsgrad der aWT	%	76	74	70
δ_{aWT}	Deckungsanteil der aWT	%	99	99	99
RG_{aWT}	Regelgüte der Variante	%	87	84	78

Hilfsenergien

Der Strombedarf der Heizkreispumpe (aWT) liegt, je nach Laufzeit der aWT zwischen 86 kWh und 120 kWh, siehe *Tabelle 31*.

Tabelle 31: Ermittelter Pumpenstrombedarf der Heizkreispumpe der aWT für die drei Varianten, ermittelt über die Laufzeit der aWT und die Leistung der Heizkreispumpe von rund 56 W

Kennwert	Name	Einheit	SFH15	SFH45	SFH75
t_{aWT}	Laufzeit der aWT	h/a	1532	1853	2139
$W_{P,aWT}$	Strombedarf Pumpe	kWh/a	86	104	120

Komfort

Mit der mathematischen Modellierung des thermischen Behaglichkeitsfeldes aus *Abbildung 67* kann die thermische Behaglichkeit als Verteilung über die Stunden der Heizperiode dargestellt werden, siehe *Abbildung 69*.

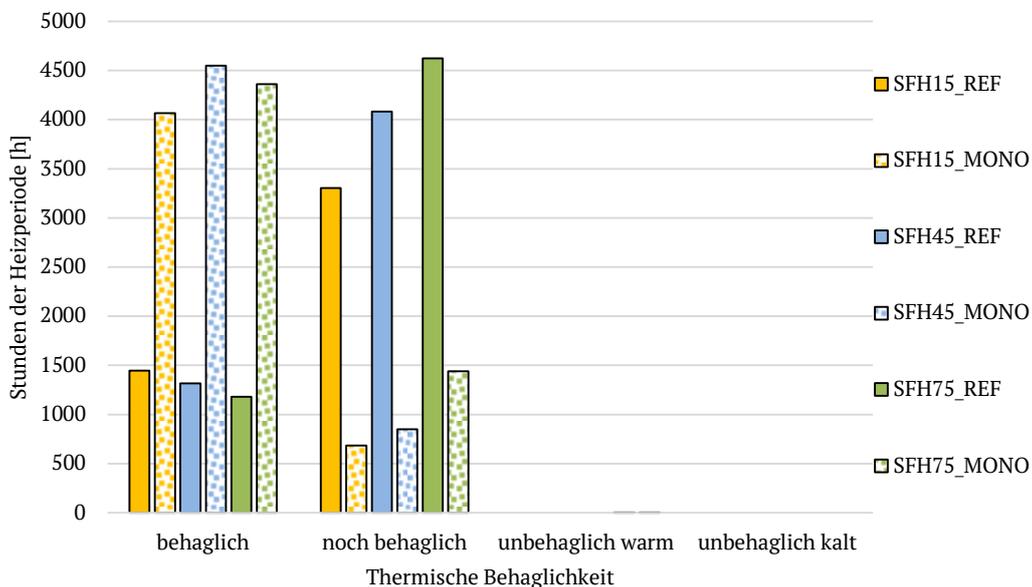


Abbildung 69: Auswertung der thermischen Behaglichkeit der monovalenten Simulationsvarianten der aWT (MONO), im Vergleich zur Referenzvariante ohne thermische Aktivierung (REF)

Als Gegenprobe wurde die Simulation nochmal ohne ideale Heizung und ohne interne Gewinne durch Personen und Geräte durchgeführt (für SFH45). In diesem Fall ist die aWT die einzige Wärmeabgabefläche unter den schlechtesten Bedingungen (keine internen Gewinne). Bei dieser Betrachtung treten in knapp 9% der Stunden der Heizperiode Raumtemperaturen <20°C auf, minimal 19°C.

Vergleich und Auswertung

Entgegen der stationären Berechnung (91%) liegt der Wirkungsgrad der aWT als Ergebnis der dynamischen Simulation bei Werten zwischen 86 und 88%. Dieser Unterschied resultiert aus den dynamischen Effekten der Wandtemperierung (veränderliche Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen). Desto höhere Vorlauftemperaturen für den monovalenten Betrieb benötigt werden, desto geringere Werte für die Regelgüte und den Nutzungsgrad der aWT werden ermittelt. Dies hängt mit den höheren Raumtemperaturen zusammen, die bei der Auswertung als Überhitzung (über das Niveau der Referenzvariante hinaus) betrachtet werden. Bezieht man den Strombedarf der Heizkreispumpe auf den thermischen Input der jeweiligen Variante, so ergeben sich Werte von 0.8 bis 2% ($W_{P,aWT}/Q_{w,aWT}$). Im überkompensatorischen, monovalenten Betrieb kann der Pumpenstrombedarf somit eher vernachlässigt werden. Bezüglich der thermischen Behaglichkeit, führt der Betrieb der aWT (im Vergleich zur Referenz-Variante) zu mehr „behaglichen“ Stunden.

Alternativer Ansatz

Alternativ kann ein Ansatz für Betonkernaktivierungen benutzt werden. Dieser wurde von Olesen et al. (2005) entwickelt, wird jedoch auch in Pfafferott (2015) und Kalz (2009) als guter und stabiler Regelalgorithmus für Betonkernaktivierungen in Niedrigenergiegebäuden dargestellt. Der Ansatz kann mit dem Bezug auf die aktuelle Außentemperatur verwendet werden, oder mit Bezug auf den gleitenden Mittelwert der letzten 24 h (T_{amb24}).

$$T_{VL,aWT} = 18 + 0.45 \cdot (18 - T_{amb})[^{\circ}C] \quad (59)$$

$$T_{VL,aWT} = 18 + 0.45 \cdot (18 - T_{amb24})[^{\circ}C] \quad (60)$$

Für die folgenden Simulationen wurde der Bezug auf die aktuelle Außentemperatur gewählt. Die Ergebnisse der Simulationen mit der Kennlinie für alle drei Gebäude können *Tabelle 32* entnommen werden. Für das Niedrigenergiegebäude SFH15 führt die Kennlinie zu einem Deckungsanteil von 100 %, also einem monovalenten Betrieb der aWT. Bei SFH45 liegt der Deckungsanteil nur noch bei 84 % und bei SFH75 bei 62 %. Wobei die Ergebnisse für SFH15 mit der Kennlinie nach Olesen et al. (2005) nicht besser sind, als mit dem Ansatz oben, siehe *Tabelle 30*. Die Regelgüte der Variante oben liegt sogar leicht über dem hier erreichten Wert. Andererseits kommen zeitweise sehr niedrige Vorlauftemperaturen (<21°C) zum Einsatz. Die Eignung des Ansatzes nach Olesen et al. (2005) für die aWT in Niedrigenergiegebäuden kann somit verifiziert werden. Für die anderen beiden Varianten wird kein monovalenter Betrieb erreicht.

Tabelle 32: Simulationsergebnisse für die Kennlinie nach Olesen et al. (2005), bezogen auf die Heizperiode und alle drei Gebäude-Varianten

Kennwert	Einheit	SFH15 _{Olesen}	SFH45 _{Olesen}	SFH75 _{Olesen}
$Q_{w,aWT}$	kWh/a	3295	6241	7548
t_{aWT}	h/a	1031	3071	3800
$T_{VL,aWT,min}$	°C	20.6	20.6	20.3
$T_{VL,aWT,max}$	°C	30.4	30.5	30.5
$W_{P,aWT}$	kWh/a	58	172	213
$Q_{H,iH}$	kWh/a	4	1221	4675
$\eta_{aWT,dyn}$	%	86	88	89
ε_{aWT}	%	73	79	79
δ_{aWT}	%	100	84	62
RG_{aWT}	%	85	75	54

Fazit „Monovalenter Ansatz“

Als Fazit des monovalenten Ansatzes kann festgehalten werden, dass für alle drei betrachteten Gebäude-Varianten eine Beheizung alleine durch die aWT möglich ist.

Interessant ist das Temperaturniveau der aWT, auch im monovalenten Betrieb. Für SFH15 werden maximal Vorlauftemperaturen von 25-26°C benötigt um den Heizwärmebedarf des Gebäudes komplett über die aWT zu decken. Für SFH45 steigt das notwendige Temperaturniveau auf etwa 35°C an (vergleichbar mit Fußbodenheizung). Und für SFH75 werden über 40°C als Vorlauftemperatur notwendig. Aus energetischer Sicht, und im Vergleich zu anderen (innenliegenden) Heizsystemen wäre somit ein monovalenter Betrieb der aWT im Gebäude SFH75 schwierig darstellbar.

Hohe Deckungsgrade gehen jedoch bei den sehr einfachen, hier verwendeten, Regelstrategien zu Lasten des Nutzungsgrades und führen zu einem Mehraufwand in der Größenordnung bis zu ca. 30 % (SFH75). Dieser Mehraufwand resultiert einerseits aus dem Wirkungsgrad der aWT und andererseits aus einer Überhitzung des Gebäudes über die Raum-Solltemperatur hinaus. Er ist somit auch ein Indikator für die Regelgüte der Variante (siehe Werte für RG_{aWT}).

Daher kann das Fazit auch folgendermaßen zusammengefasst werden: Je geringer der Heizwärmebedarf des Gebäudes, desto „einfacher“ ist der monovalente Betrieb der aWT regelbar und umsetzbar (hoher Nutzungsgrade bei hohen Deckungsanteilen). Dies resultiert aus den höheren Vorlauftemperaturen (über die Raumtemperatur hinaus) und der großen Tägheit der aWT.

1.8.3.4 Bivalenter Ansatz (Einsatz der aWT als Bauteilaktivierung)

Beim bivalenten Ansatz wird davon ausgegangen, dass ein zweites (inneres) Heizsystem für den „Rest-Wärmebedarf“ existiert. Ziel des Einsatzes der aWT ist es, den Heizwärmebedarf für das innere Heizsystem und dessen notwendige Heizlast zu verringern. Es wird davon ausgegangen, dass eine Abwärme- oder Umweltwärmequelle existiert, die eine konstante Temperatur mit ausreichendem Massenstrom für die aWT zur Verfügung stellt. Dies entspricht einer Vereinfachung, zwar existieren Abwärmequellen, die zeitlich unabhängig eine konstante Vorlauftemperatur „liefern“ (z.B. Grubenwasser, industrielle Abwärme), andererseits sind Umweltwärmequellen oft zeitabhängig (Solarthermie, Umgebungsluft, oberflächennahe Erdwärme). Die Verwendung solcher volatiler Wärmequellen für die aWT (z.B. mittels Wärmepumpe) bedarf einer spezifischen Untersuchung.

Beim bivalenten Ansatz werden Simulationen mit konstanten Vorlauftemperaturen durchgeführt und ausgewertet.

Abgrenzung der Betriebsmodi

Teilkompensatorischer Betrieb

Im teilkompensatorischen Betrieb wird die aWT mit Vorlauftemperaturen unterhalb der Raumtemperatur betrieben, die Transmissionswärmeverluste werden somit teilkompensiert, siehe Kapitel I4.1.1.1. Der teilkompensatorische Betrieb führt zu einer Verringerung der Heizlast und des Heizwärmebedarfs für das innere Heizsystem. Im teilkompensatorischen Betrieb kann die aWT immer nur Teil eines bivalenten Systems sein.

Kompensatorischer Betrieb

Im kompensatorischen Betrieb wird die aWT genutzt, um die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen (vollständig) zu kompensieren. Dementsprechend handelt es sich eher um eine Grundlasttemperierung mit niedrigen Vorlauftemperaturen und langen Laufzeiten. Auch der kompensatorische Betrieb dient zur Heizlastreduzierung für das innere Heizsystem, zudem findet eine Verringerung des Heizwärmebedarfs statt. Demzufolge kann die aWT auch im kompensatorischen nur Teil eines bivalenten Systems sein. Der Deckungsanteil der aWT im kompensatorischen Betrieb kann bzgl. der Größenordnung höchstens im Bereich des Anteils der Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen an dem gesamten Heizwärmebedarf liegen, siehe Abschätzung.

Überkompensatorischer Betrieb

Im überkompensatorischen Betrieb werden die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen vollständig kompensiert und zusätzlich können die belegten Flächen einen Nutzwärmestrom in das Gebäude zur Verfügung stellen, zur Abdeckung weiterer Wärmeverluste. Auch im überkompensatorischen Betrieb kann die aWT als Grundlasttemperierung betrieben werden.

Abschätzung für den (teil)kompensatorischen Betrieb

Der maximale Deckungsanteil der aWT im (teil)kompensatorischen Betrieb kann vereinfacht abgeschätzt werden. Entsprechend der Idee des kompensatorischen Betriebs können die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen komplett kompensiert werden. Über die Energiebilanzen und die Anteile der Bauteile an den Transmissionswärmeverlusten kann dieser Einfluss überschlägig ermittelt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle anderen Größen der Energiebilanz konstant bleiben. Die Aufteilung der Transmissionswärmeverluste in die einzelnen Bauteile kann *Tabelle 33* entnommen werden. Die unterstrichenen Werte könnten im kompensatorischen Betrieb vollständig kompensiert werden. Dementsprechend können die Transmissionswärmeverluste aus *Tabelle 27* um die unterstrichenen Werte reduziert werden. Die entsprechend angepasste „neue“ Energiebilanz kann *Tabelle 34* entnommen werden. Bei Annahme des Nutzungsgrades gleich dem Wirkungsgrad müssten den Gebäuden entsprechend $1881/0.914 = 2057$ bzw. $1864/0.914 = 2048$ bzw. $1839/0.914 = 2012$ kWh in der aWT zur Verfügung gestellt werden. Der maximal erreichbare Deckungsanteil im kompensatorischen Betrieb würde damit bei SFH15 bei 78%, bei SFH45 bei 32% und bei SFH75 bei 18% liegen, siehe *Tabelle 35*.

Tabelle 33: Aufteilung der Transmissionswärmeverluste in die einzelnen Bauteile der Varianten

Gebäude Bauteil	SFH15		SHF45		SFH75	
	Q_{trans} [kWh/a]	Anteil [%]	Q_{trans} [kWh/a]	Anteil [%]	Q_{trans} [kWh/a]	Anteil [%]
Dach	902	16	1430	17	4609	33
Fenster	1631	29	2850	35	5208	37
Außenwand (unbelegt)	449	8	443	5	437	3
Außenwand (belegt)	<u>1881</u>	34	<u>1864</u>	23	<u>1839</u>	13
Bodenplatte	691	12	1624	20	1851	13
Σ	5554	100	8212	100	13944	100

Tabelle 34: Berechnete Jahres-Energiebilanz für den idealisierten kompensatorischen Betrieb der drei Varianten (angepasste Werte in roter Farbe dargestellt)

Gewinne [kWh]	SFH15	SFH45	SFH75	Verluste	SFH15	SFH45	SFH75
Solare Gewinne	2912	4029	5163	Transmission	3673	6290	12105
Interne Gewinne	1697	1953	2078	Lüftung/Infiltration	1526	4001	4096
Ideale Heizung	590	4309	8960				
Gesamt	5199	10291	16201		5199	10291	16201

Tabelle 35: Maximal erreichbare Deckungsanteile im rein (teil)kompensatorischen Betrieb

Variante	$Q_{w,aWT}$ [kWh/a]	$Q_{H,iH}$ [kWh/a]	δ_{aWT} [%]
SFH15	2057	590	78
SFH45	2048	4309	32
SFH75	2012	8960	18

Diese Abschätzung kann jedoch nur dazu dienen die ungefähre Größenordnung oder das maximale Potential des kompensatorischen Betriebs zu ermitteln. Durch den Einsatz der aWT entstehen auch Änderungen an den anderen Größen der Energiebilanz, so dass die oben ermittelten Werte in der Simulation nur schwer zu erreichen sind, siehe die folgenden Simulationsergebnisse.

Simulationsergebnisse mit konstanten Vorlauftemperaturen

Energetische Größen und Laufzeiten

In Abbildung 70 bis *Abbildung 72* sind die Simulationsergebnisse für SFH15, SFH45 und SFH75 für konstante Vorlauftemperaturen (bis zu einem Deckungsanteil der aWT von 100%) dargestellt. Dabei wurde der Bereich der drei Betriebsmodi überschlägig farblich markiert, da eine genaue Abgrenzung nicht möglich ist. Für das Gebäude SFH15 wird bereits mit einer Vorlauftemperatur von 22°C ein Deckungsanteil der aWT (δ_{aWT}) von rund 90% erreicht, bei SFH45 werden hierfür ca. 26°C benötigt und für SFH75 ca. 30°C. Eine Vorlauftemperatur von 20°C ergibt bei SFH15 einen Deckungsanteil von rund 50%, bei SFH45 von 26% und bei SFH75 von 21%. Der oben ermittelte Deckungsanteil als Potential des kompensatorischen Betriebs wird für alle drei Varianten im Temperaturbereich zwischen 19 und 22°C erreicht, also im Bereich des kompensatorischen Betriebs. Auch die maximale Laufzeit der aWT liegt in diesem Temperaturbereich, also im kompensatorischen Betrieb. Dies ist eine Folge der Abschaltbedingung der aWT in Abhängigkeit der Raumtemperatur. Für die Simulation wurde die Abschalttemperatur auf 20.5°C gesetzt, siehe Kapitel 1.8.3.1, daher liegt die maximale Laufzeit der aWT in diesem Temperaturbereich. Für den Nutzungsgrad (ϵ_{aWT}) ergibt sich das Maximum im teilkompensatorischen Betrieb. Im weiteren Verlauf bzw. bei höheren Vorlauftemperaturen nimmt der Nutzungsgrad stetig ab. Betrachtet man den Verlauf der Regelgüte (RG_{aWT}) über die Vorlauftemperatur, so ergibt sich ein Maximum für alle drei Gebäude bei einem Deckungsanteil von ca. 98%.

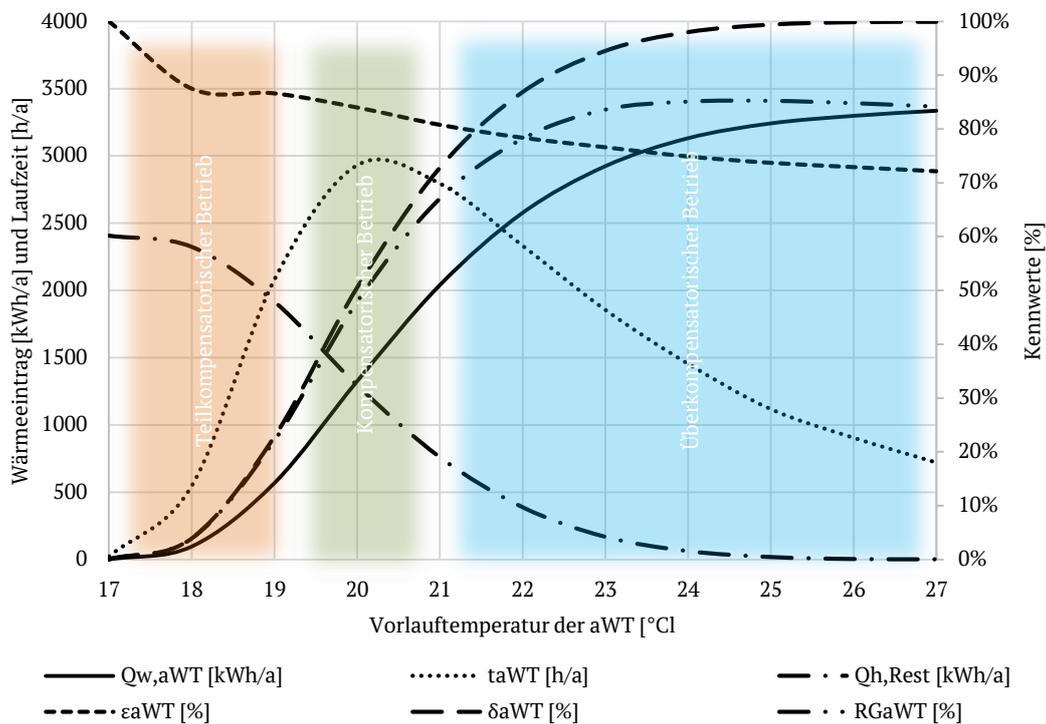


Abbildung 70: Überblick Simulationsergebnisse (SFH15) für konstante Vorlauftemperaturen mit Markierung der ungefähren Bereiche der Betriebsmodi

Tabelle 36: Beschreibung der Größen aus der Legende von Abbildung 70 bis Abbildung 72

Abkürzung	Beschreibung
$Q_{w,aWT}$	Wärmeeintrag der aWT
t_{aWT}	Laufzeit der aWT
$Q_{H,Rest}$	Rest-Heizwärmebedarf

ϵ_{aWT}	Nutzungsgrad der aWT
δ_{aWT}	Deckungsanteil der aWT
RG_{aWT}	Regelgüte der Variante

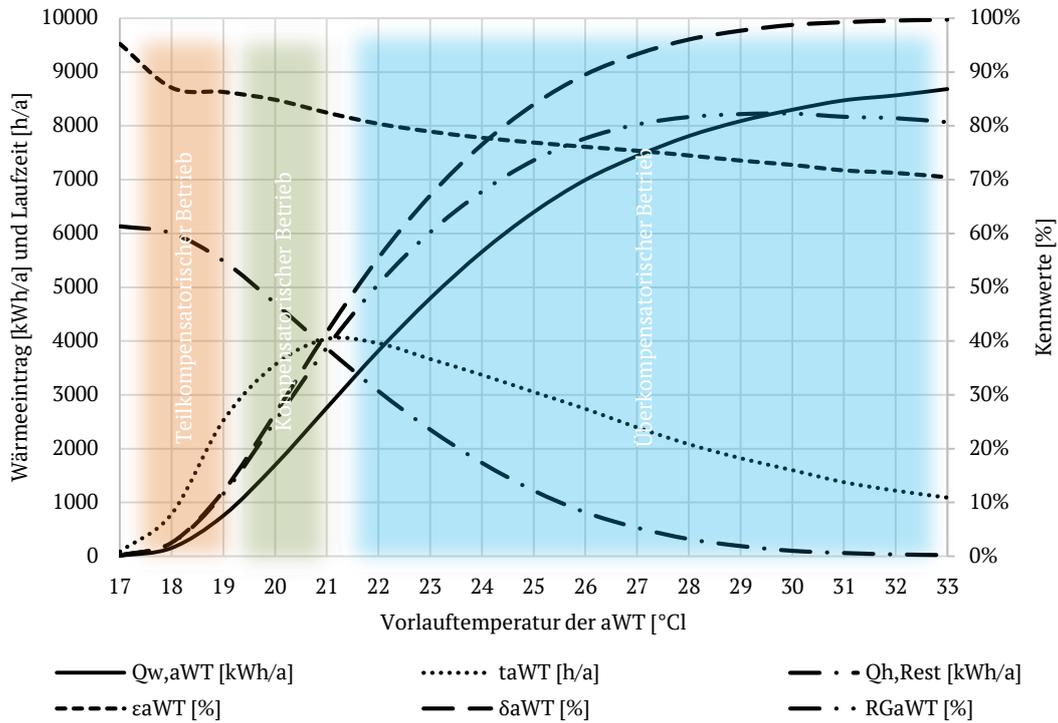


Abbildung 71: Überblick Simulationsergebnisse (SFH45) für konstante Vorlauftemperaturen mit Markierung der ungefähren Bereiche der Betriebsmodi

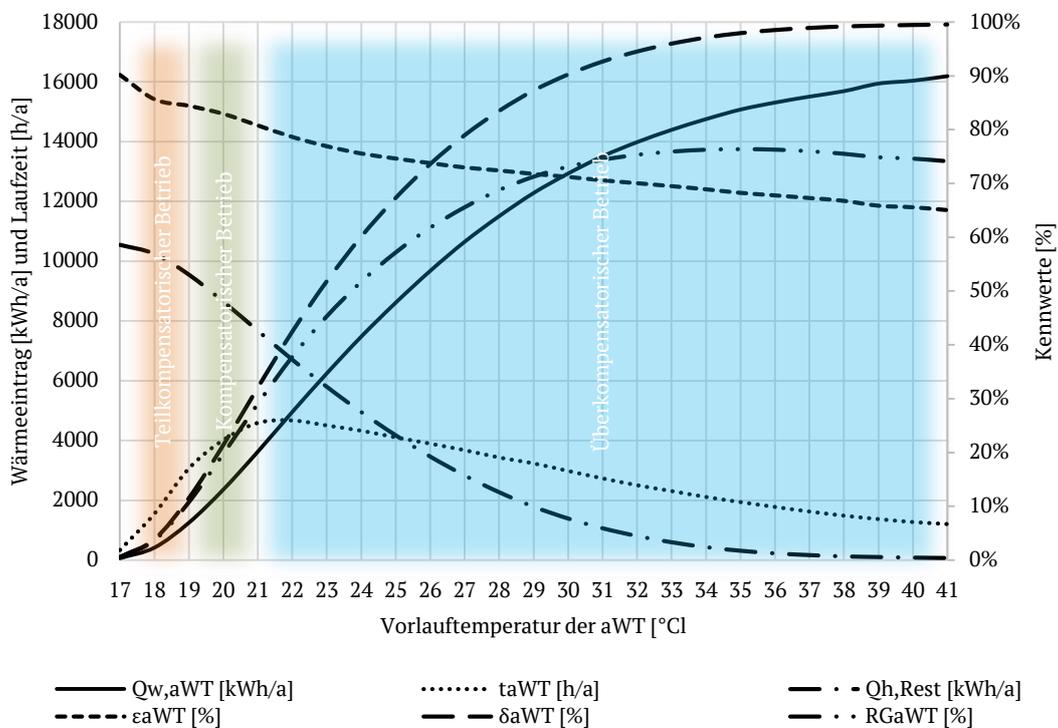


Abbildung 72: Überblick Simulationsergebnisse (SFH75) für konstante Vorlauftemperaturen mit Markierung der ungefähren Bereiche der Betriebsmodi

Hilfsenergien

In *Abbildung 73* ist der Pumpenstrombedarf der aWT als Ergebnis der Laufzeit der aWT über die Vorlauftemperatur dargestellt. Auch das Verhältnis von Pumpenstrombedarf zum thermischen Input der aWT ist dargestellt. Zu erkennen ist, dass im teilkompensatorischen Betrieb das Verhältnis vom elektrischen Aufwand zum thermischen Nutzen bei ca. 20-30% liegt. Im kompensatorischen Betrieb liegt das Verhältnis bei ca. 10% und im überkompensatorischen Betrieb werden Werte zwischen 5% und < 1% erzielt. Im überkompensatorischen Betrieb nimmt einerseits die Laufzeit der aWT ab und gleichzeitig steigt, in Folge höherer Vorlauftemperaturen, der thermische Input. Demzufolge nimmt die Relevanz des Pumpenstrombedarfs über die Vorlauftemperatur ab. Bezieht man die maximale Laufzeit der aWT auf die Länge der Heizperiode, so läuft die aWT bei SFH15 in 60% der Stunden der Heizperiode, bei SFH45 in 75% der Stunden und bei SFH75 in 80% der Stunden.

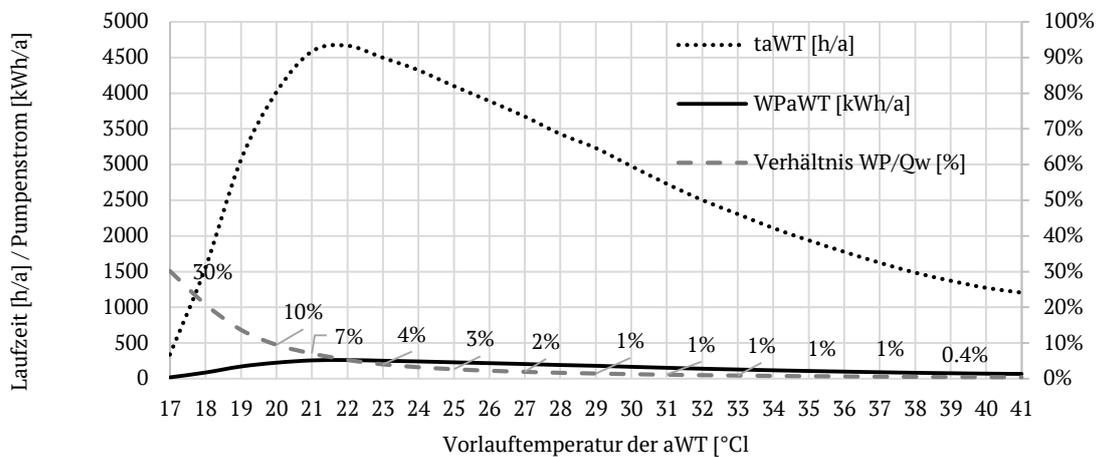
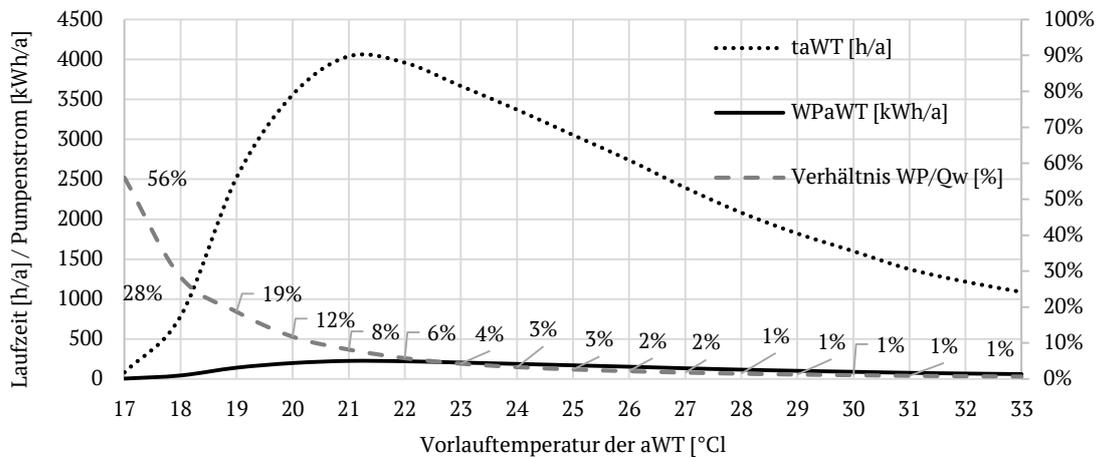
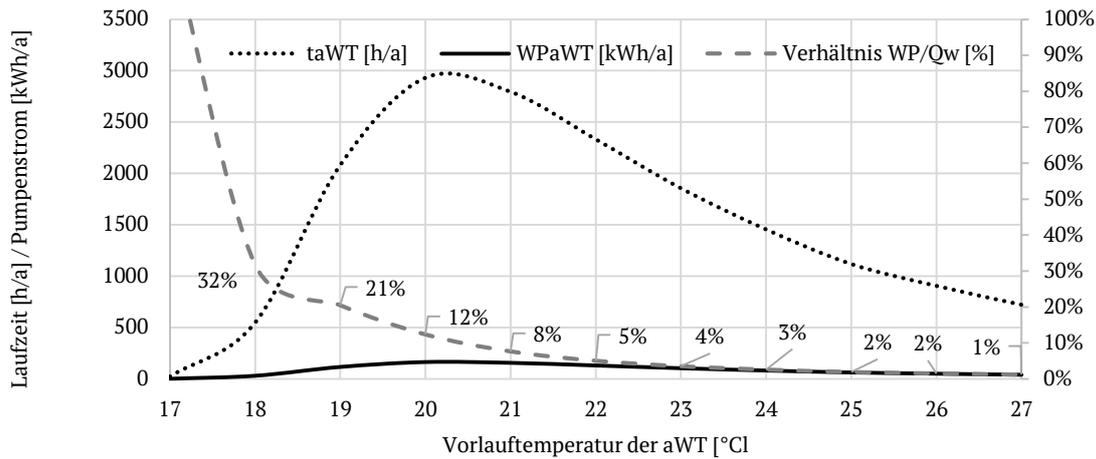


Abbildung 73: Laufzeit, Pumpenstrombedarf und das Verhältnis von Pumpenstrom zum thermischen Input über die Vorlauftemperatur aufgetragen; SFH15 (oben), SFH45 (mittig), SFH75 (unten)

Komfort

Bezogen auf die thermische Behaglichkeit steigen die „behaglichen“ Stunden mit höherer Vorlauftemperatur der aWT, siehe *Abbildung 74*. Mit höherer Vorlauftemperatur kommt es als direkter Einfluss zu höheren Oberflächentemperaturen und als indirekter Einfluss in Folge der Trägheit zu höheren Raumtemperaturen (Nutzungsgrad und Regelgüte). Daher steigt auch die thermische Behaglichkeit entsprechend dem verwendeten Modell. Relevant ist auch, dass es zu keinen unbehaglich warmen Stunden durch den Betrieb der aWT kommt, gerade bei höheren Vorlauftemperaturen. Bei SFH75 werden unbehaglich warme Stunden ab einer Vorlauftemperatur von 35°C ermittelt (2 h); bei einer Vorlauftemperatur von 41°C treten in 15 h der Heizperiode „unbehaglich warme“ Temperaturen auf.

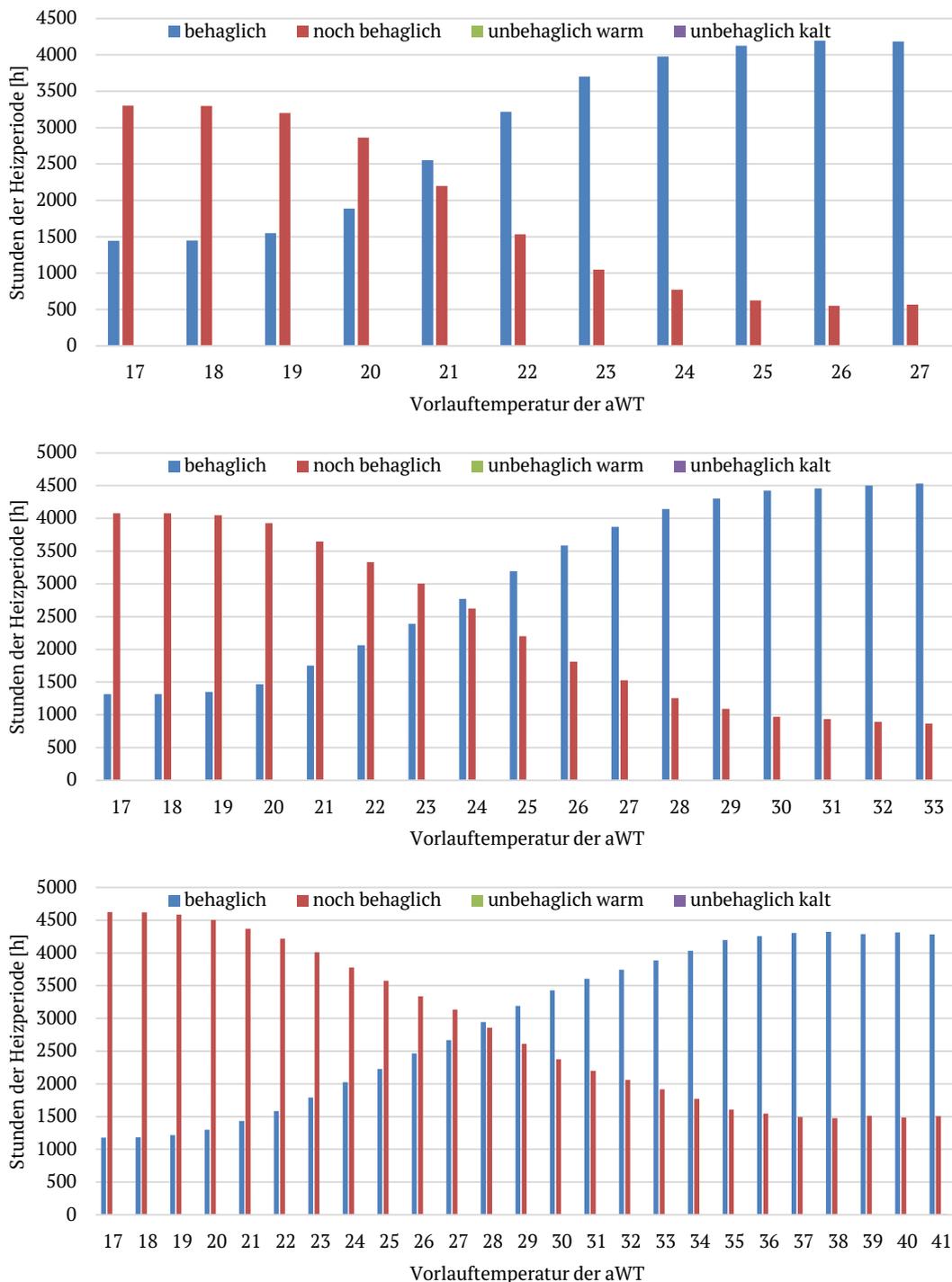


Abbildung 74: Auswertung der thermischen Behaglichkeit für SFH15 (oben), SFH45 (mittig) und SFH75 (unten)

Vergleich und Auswertung

➤ (Teil)Kompensatorischer Betrieb

Wichtig für den (teil)kompensatorischen Betrieb ist eine lange Laufzeit der aWT in der Heizperiode. Wird dies erreicht, können auch die Werte für den Deckungsanteil aus der Abschätzung erzielt werden. Je nach energetischem Gebäude-Standard und Anteil der belegten Flächen an den gesamten Wärmeverlusten des Gebäudes, können Deckungsanteile bis knapp 30 % erreicht werden. Dieses Ergebnis für (SFH15) unterstreicht den niederexergetischen Ansatz der aWT, da dieser Deckungsanteil mit Fluidtemperaturen unter/bei Raumtemperatur erzielt wird. Der hohe Wert für SFH15 resultiert auch aus der in SFH15 berücksichtigten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Dieser Effekt wird detaillierter in Kapitel 1.8.4 betrachtet. Bei energetisch schlechteren Bestandgebäuden (SFH75) kann der Deckungsanteil jedoch deutlich geringere Werte annehmen (<10 %). Für alle Varianten gleich ist, dass der Pumpenstrom durch die lange Laufzeit der aWT und den eher geringen thermischen Input über die aWT relevante Größenordnungen erreicht (~30%). Unter primärenergetischen Gesichtspunkten ist diese Größenordnung kritisch zu betrachten.

Umgekehrt zeichnet sich der teilkompensatorische Betrieb jedoch auch durch sehr hohe dynamische Wirkungsgrade (90 - 91%) und Nutzungsgrade (>85%) aus. Dies zeigt, dass die stationäre Ermittlung des Wirkungsgrads (91%) bzgl. der Größenordnung durch die dynamische Ermittlung bestätigt werden kann. Da durch die aWT im (teil)kompensatorischen Betrieb keine Überhitzung verursacht werden kann, ist die Regelung der aWT hier unproblematisch. Wichtig ist, wie oben beschrieben, eine lange Laufzeit unter Vermeidung eines Wärmeentzugs aus der Fassade und unter Ansetzung einer „sinnvollen“ Ausschalt-Raumtemperatur der aWT. Eine ggfs. auftretende Überhitzung resultiert aus den internen Gewinnen und der (solaren) Einstrahlung in das Gebäude.

Bei Betrachtung der Regelgüte (RG_{aWT}) fällt auf, dass hier nur sehr geringe Werte erreicht werden. Diese geringen Werte resultieren aus dem Bezug auf einen Deckungsanteil von 100%. Dieser ist jedoch im (teilkompensatorischen Betrieb) nicht erreichbar und auch keine Zielgröße.

Im Grunde genommen besteht im (teil)kompensatorischen Betrieb ein Zielkonflikt zwischen den maximal möglichen Deckungsanteilen und dem Wirkungsgrad der aWT. Wird die Bestandswand hoch wärmegeädämmt, steigt zwar der Wirkungsgrad der aWT, gleichzeitig sind jedoch auch nur geringe Deckungsanteile im kompensatorischen Betrieb zu erreichen, sofern nicht die komplette thermische Hülle des Gebäudes in der gleichen Qualität optimiert wird. Diese Tatsache wird aus dem Vergleich zwischen den drei Gebäudevarianten ersichtlich. Geringe Dämmstärken führen zwar ggfs. zu höheren Deckungsanteilen, der absolute energetische Aufwand steigt jedoch. Der (teil)kompensatorische Effekt beschränkt sich auf den Anteil der thermisch aktivierten Flächen an den gesamten Transmissionswärmeverlusten.

➤ Überkompensatorischer Betrieb

Deutlich ist anhand der Ergebnisse zu erkennen, dass mit zunehmender Vorlauftemperatur der Nutzungsgrad (ϵ_{aWT}) absinkt. Die aWT führt in diesen Fällen vermehrt zu einer Überhitzung des Raumes, über die Solltemperatur hinaus. Dies zeigt auch die geringere Laufzeit der aWT (t_{aWT}) bei höheren Vorlauftemperaturen. Hierbei handelt es sich wiederum um eine Regelungsaufgabe. Es gilt ein Optimum zu finden zwischen Laufzeit und Vorlauftemperatur. Üblich sind zum Beispiel außentemperaturabhängige Heizkennlinien. Da diese jedoch abhängig von einem evtl. vorhandenen Abwärme- oder Niedertemperaturpotential und dem sekundären Heizsystem sind, sind diese spezifisch zu bestimmen und zu untersuchen.

Durch die geringeren Laufzeiten und dem größeren thermischen Input bei höheren Temperaturen ist hingegen der Strombedarf der Heizkreispumpe im überkompensatorischen Betrieb weniger relevant. Bezogen auf den thermischen Input liegt der Anteil des Strombedarfs der Heizkreispumpe bei höheren Vorlauftemperaturen sogar unter 1 %.

Fazit „Bivalenter Ansatz“

Interessant sind im bivalenten Betrieb vor allem die Einsatzmöglichkeiten bzw. die energetischen Potentiale mit niedrigen Vorlauftemperaturen. Für sehr gut isolierte Gebäude (SFH15) können mit sehr niedrigen Fluidtemperaturen bereits hohe Deckungsgrade erreicht werden. Natürlich ist der Heizwärmebedarf bei solchen Gebäuden generell so niedrig, dass Aufwand (Kosten für thermische Aktivierung & Pumpenstrom) und Ertrag (Reduktion des Heizwärmebedarfs für das sekundäre Heizsystem) genau miteinander verglichen werden müssen. Aus energetischer Sicht bieten sich hier jedoch interessante Einsatzfälle für Niedertemperatur-Wärmequellen. Beachtet werden muss beim bivalenten, (teil)kompensatorischen Ansatz, dass der Pumpenstrombedarf in einem sinnvollen Verhältnis zum thermischen Input über die Wandtemperierung steht.

Wie bereits oben angesprochen bieten sich auch für den bivalenten, überkompensatorischen Betrieb Heizkennlinien an (z.B. außentemperaturgeführt). Entsprechend Kalz (2009) führen Kennlinien im Vergleich zu konstanten Vorlauftemperaturen zu Einsparungen beim Pumpenstrom von bis zu 10 %. Diese Aussage bezieht sich auf Betonkernaktivierungen. Dies konnte für die aWT durch Simulationsstudien bestätigt werden, bei der aWT kann jedoch auch der gegenteilige Effekt eintreten, siehe die Ergebnisse in *Tabelle 37*. Bezogen auf die aWT ist wichtig, in welchem Betriebsbereich die Kennlinien liegen bzw. welcher Ansatz gewählt wurde (bivalent oder monovalent). Im (teil)kompensatorischen Betrieb werden längere Laufzeiten erzielt, als im überkompensatorischen Betrieb, daher sollten Kennlinien mit dem Fokus auf geringer Laufzeit im überkompensatorischen Bereich liegen. Für die beiden Beispiele aus *Tabelle 37* werden beim Einsatz von Kennlinien höhere Nutzungsgrade und höhere Werte für die Regelgüte erzielt:

- Die außentemperaturgeführte Heizkennlinie erreicht einen leicht höheren Deckungsanteil, bei geringerem Pumpenstrombedarf und besserem Nutzungsgrad. Im Endeffekt resultiert daraus auch eine leicht bessere Regelgüte.
- Der Ansatz nach Olesen et al. (2005) erreicht den gleichen Deckungsanteil wie die Variante mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 25°C, jedoch einen besseren Nutzungsgrad und eine bessere Regelgüte. Bei diesem Beispiel liegt eine längere Laufzeit der aWT vor. Dies widerspricht somit der Aussage aus Kalz (2009).

Entsprechend diesen Beispielen können eine Vielzahl von Kennlinien entwickelt werden, je nach Optimierungsziel.

Tabelle 37: Beispielhafter Vergleich zwischen Simulationen mit konstanter Vorlauftemperatur (23°C und 25°C) der aWT, außentemperaturgeführten Heizkennlinie zwischen 21 und 26°C für SFH45 (TVL_21_26) und der Kennlinie nach Olesene et al. (2005)

Kennwert	Einheit	TV_23	TVL_21_26	TV_25	Olesen
$Q_{w,aWT}$	kWh/a	4794	4941	6395	6241
t_{aWT}	h/a	3668	3650	3055	3071
$W_{P,aWT}$	kWh/a	205	204	171	172
η_{aWT}	%	88	88	88	88
ε_{aWT}	%	79	80	77	79
δ_{aWT}	%	67	69	84	84
RG_{aWT}	%	60	63	74	75
Beschreibung		konstant	Kennlinie	konstant	Kennlinie

1.8.3.5 Fazit „Simulationen aWT“

Der Betrieb der aWT als alleiniges Heizsystem oder mit hohen Deckungsanteilen, ist mit einem energetischen Mehraufwand verbunden, der sich aus zwei Komponenten zusammensetzt:

- Wirkungsgrad der aWT: Der Wirkungsgrad der aWT verursacht einen zusätzlichen Mehraufwand, der für die betrachteten Gebäuden in der Größenordnung von 10% liegt. Dieser Mehraufwand könnte durch eine dickere Wärmedämmung der Wand verbessert werden, liegt aber bereits eher am oberen Ende des (auch wirtschaftlich) sinnvollen Bereichs.
- Regelgüte der verwendeten Regelstrategie: Ein weiterer Mehraufwand wird durch die Regelung der aWT verursacht. Durch die Trägheit kommt es auch nach Abschalten der aWT zu einer Wärmeabgabe in den Raum. Dies führt zu einer Übertemperierung (über den Sollwert hinaus) und ist daher rechnerisch als Mehraufwand zu betrachten, unabhängig von einer ggfs. verursachten höheren thermischen Behaglichkeit. Durch angepasste Regelstrategien kann dieser Mehraufwand minimiert bzw. auch bezüglich der thermischen Behaglichkeit optimiert werden.

Bei einer Vorlauftemperatur von 21°C liegt der Mehraufwand zwischen 7% (SFH75), 8% (SFH45) und maximal 16% (SFH15), siehe *Abbildung 75*, und damit bei SFH45 & SFH75 genau in der Größenordnung des stationären Wirkungsgrades der aWT. Umgekehrt ausgedrückt: Bei SFH45 wird für die Variante mit 33°C Vorlauftemperatur für den Ersatz von 1 kWh der idealen/inneren Heizung ca. 1.4 kWh der aWT benötigt. Davon gehen rund 0.2 kWh zusätzlich über die Außenfassade „verloren“ und weitere ca. 0.2 kWh führen zu einer Übertemperierung des Raumes. Diese 0.2 kWh, die zu einer Übertemperierung des Raumes führen können als Herausforderungen für die Regelung betrachtet werden. Bei einer optimal regelten aWT würde 1 kWh der idealen Heizung durch ca. 1.1 - 1.2 kWh der aWT ersetzt werden, dann würde der Mehraufwand nur aus dem Anteil des Wirkungsgrades der aWT bestehen und wäre auch unabhängig von der Vorlauftemperatur. Da die aWT jedoch auch den Einsatz von Niedertemperatur(ab)wärme und den vermehrten Einsatz von Umweltenergie ermöglicht, muss dieser energetische Mehraufwand unter systemischen Gesichtspunkten analysiert werden.

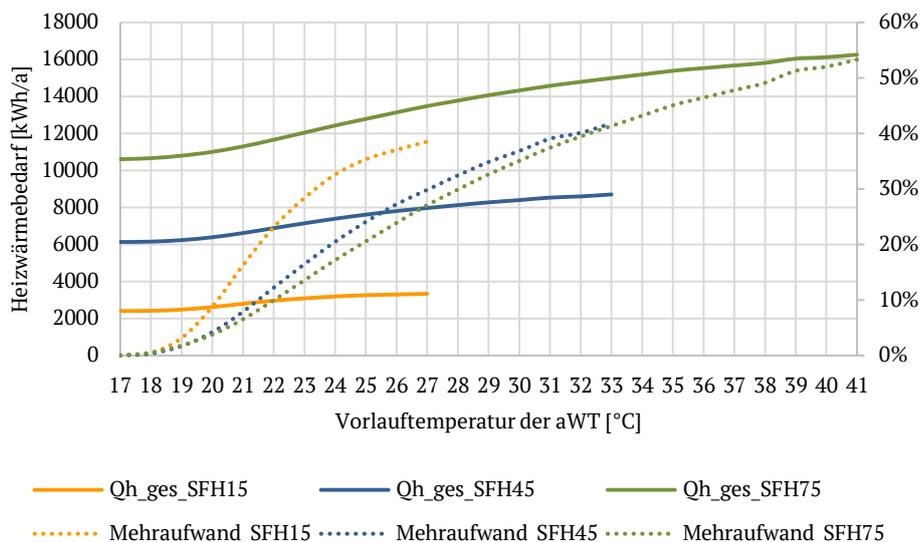


Abbildung 75: Gesamter Heizwärmebedarf beim Betrieb der aWT (+inneres Heizsystem) über die Vorlauftemperatur aufgetragen. Zusätzlich ist der (energetische) Mehraufwand durch den Betrieb der aWT dargestellt [%]

Als zusätzliches Fazit kann festgehalten werden, dass einerseits eine monovalente Beheizung aller drei Gebäude über die aWT möglich ist und andererseits, dass der Einsatz von Kennlinien, statt konstanter Vorlauftemperaturen, zu besseren Ergebnissen führt. Ein Optimierungsziel für den Betrieb der aWT ist somit passende Kennlinien für den geplanten Betrieb (monovalent/bivalent) zu ermitteln; bestenfalls basierend auf ggfs. vorhandenen Abwärme- oder Umweltenergiepotentialen.

1.8.4 Simulationen mit außenliegender Lufttemperierung

Da noch keine nutzbaren Ergebnisse zur Validierung der Simulationsmodelle für die Feldtestfläche der aLT vorliegen, wird bei den folgenden Simulationen auf die, durch die Laborwand validierten, Modelle zurückgegriffen. Um in dem validierten Bereich zu bleiben, wird die aLT auf die Randbedingungen der Laborwand ausgelegt (Volumenstrom, Luftspalt). Für die Simulationen der aLT wird wiederum das Referenzgebäude aus der IEA Task, entsprechend Dott et al. (2013), benutzt. Dies führt zu einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die aLT wird mittels Type 1230 modelliert, siehe Schmidt (2019).

1.8.4.1 Anpassungen des Referenzgebäudes

Es werden zwei Änderungen an dem Referenzgebäude vorgenommen:

- 1) Integration des Types 1230 und Aufteilung der thermischen Hülle zwischen Type 56 und Type 1230.
- 2) Das Gebäude SFH45 erhält durch die Integration der aLT eine mechanische Belüftung (Ventilation). Der gesamte Luft-Volumenstrom wird dem Gebäude über die aLT zugeführt.

Durch Simulationsläufe und Vergleiche mit den Ergebnissen aus Kapitel 1.8.2.4 wurde verifiziert, dass die Änderungen keinen relevanten Effekt auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes besitzen (Ventilation ohne WRG und nicht über aLT). Kleine Abweichungen sind jedoch auch zu erwarten, da für die aLT eine 20 mm Luftschicht hinzugefügt wurde und sich somit der U-Wert der entsprechenden Bauteile minimal verbessert.

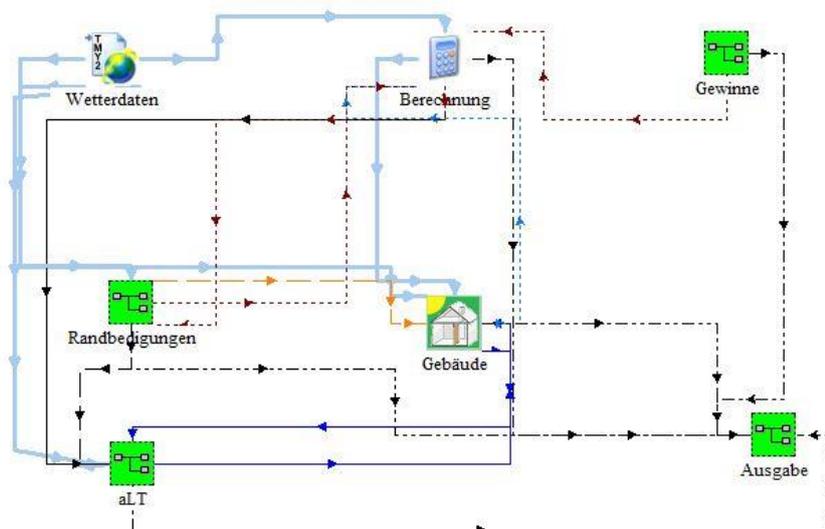


Abbildung 76: Screenshot des Simulation Studios in TRNSYS für die aLT-Simulationen

1.8.4.2 Auslegung der aLT

Das Volumen des Gebäudes beträgt rund 390 m³. Für die mechanische Lüftung wird ein konstanter Luftwechsel von 0.4 h⁻¹ angenommen. Daraus ergibt sich ein Luft-Volumenstrom durch die aLT von ca. 156 m³/h. Die notwendige Fläche der aLT wurde mit der ermittelten Wärmeübertragerkennzahl so berechnet, dass bei Auslegungstemperatur (-10°C) die einströmende Luft, bei einer Vorlauftemperatur in den Kapillaren von 35°C, einen Wert von 20°C nicht unterschreitet. Mit diesen Randbedingungen wurde eine notwendige aLT-Fläche von ca. 12 m² ermittelt. Da das Gebäude nur aus einer Zone besteht, wurde auch nur eine zentrale Fläche für die aLT modelliert.

1.8.4.3 Ergebnisse

Da in das Gebäude SFH15 bereits eine Lüftungsfunktion mit Wärmerückgewinnung integriert ist, wird sich bei den Ergebnissen mit der aLT auf das Gebäude SFH45 fokussiert. Die Ergebnisse von SFH45 sind auf SFH75 übertragbar bzw. skalierbar.

Luftführung durch die Fassade, ohne Betrieb der aLT

In *Tabelle 38* sind die Referenz-Ergebnisse für die Variante „SFH45 mit aLT“ dargestellt. Dabei wurden in SFH45_{Ref} die beiden Änderungen aus 1.8.4.1 umgesetzt, jedoch noch ohne Luft-Volumenstrom durch die aLT. In SFH45_{Ref,aLT} wurde der Luft-Volumenstrom durch die aLT aktiviert, jedoch ohne Sole-Volumenstrom durch die thermische aktive Schicht in der Wandkonstruktion. Diese beiden Varianten sind die Referenz-Varianten für die folgenden Simulationen unter Nutzung der aLT.

Tabelle 38: Referenzergebnisse für SFH45, ohne Luftführung durch die Fassade (Ref) und mit Luftführung durch die Fassade (Ref,aLT)

Kennwert	Einheit	SFH45 _{Ref}	SFH45 _{Ref,aLT}
$Q_{H,Rest}$	kWh/a	6074	6047
Q_{trans}	kWh/a	8154	9189
Q_{vent}	kWh/a	4002	2993

Durch den Vergleich der beiden (Referenz)Spalten wird der Effekt der die thermische Hülle durchströmenden Luft erkennbar. Die Transmissionswärmeverluste steigen an, die Lüftungswärmeverluste hingegen nehmen ab, insgesamt ist der Effekt ziemlich ausgeglichen und der Gesamt-Wärmebedarf nimmt nur leicht ab. Zu erkennen ist der Effekt auch in *Abbildung 77*. Ohne die aLT strömt die Luft mit Umgebungstemperatur (grau) in das Gebäude. Nach Integration der aLT (schwarz) werden höhere Zulufttemperaturen erreicht. Wird der Sole-Massenstrom durch die Kapillarrohrratten mit einer konstanten Vorlauftemperatur aktiviert, kommt es zu deutlich höheren Zulufttemperaturen. Bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 20°C (TVL20) wird der rote Verlauf der Zulufttemperatur erreicht und bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 25°C (TVL25) wird der blaue Verlauf der Zulufttemperatur erreicht.

Betrachtet man sich die Kühlperiode in *Abbildung 77* (Zeitraum zwischen 3000 und 6000 h), so wird ein weiterer Effekt der aLT erkennbar. In der Kühlperiode findet eine Vortemperierung der Zuluft statt, auch bei deaktivierter aLT. Die den Luftspalt durchströmende Luft wird durch die Bestandswand abgekühlt und betritt den Raum mit einer geringeren Temperatur als die Umgebungsluft. Dies kann als eine Art „Dämpfungsfaktor“ durch die Trägheit bzw. Speichermasse der massiven Bestandswand betrachtet werden. Diese Dämpfung hat den Vorteil, dass warme Umgebungsluft über Tag abgekühlt wird, umgekehrt aber, über Nacht, kühlere Umgebungsluft auch aufgewärmt wird.

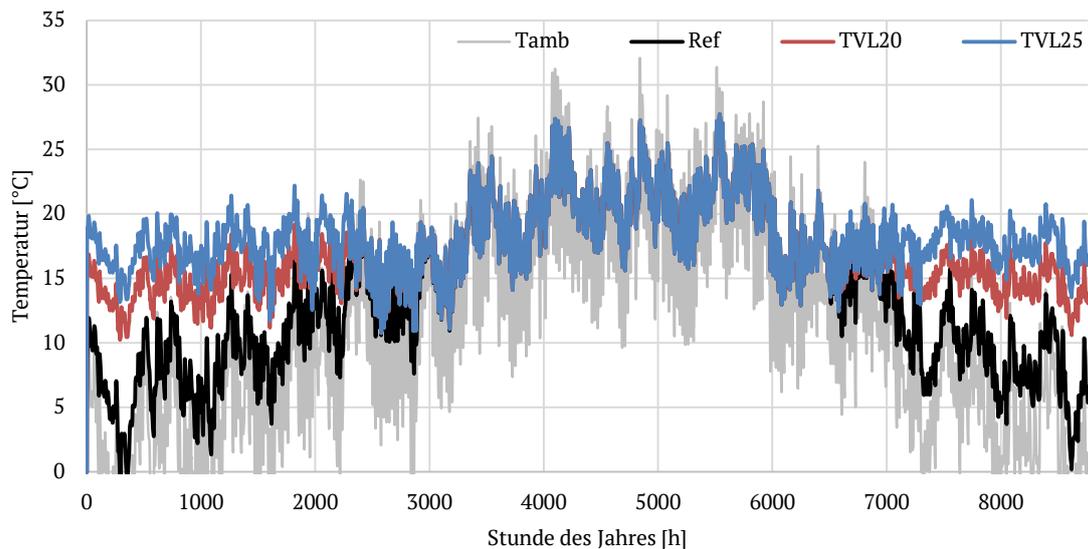


Abbildung 77: Zulufttemperatur über ein Jahr für Gebäude SFH45 und verschiedene Simulationsläufe

Ergebnisse mit konstanten Vorlauftemperaturen

In *Tabelle 39* sind die Simulationsergebnisse für konstante Vorlauftemperaturen zwischen 17°C und 40°C dargestellt. Wie erwartet liegt der Wirkungsgrad der aLT leicht über dem Wirkungsgrad der aWT aus Kapitel 1.8.2.4. Es werden hingegen deutlich höhere Nutzungsgrade als bei der aWT erzielt (aWT mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 25°C, $\varepsilon_{aLT} = 77\%$). Dies zeigt die deutlich bessere Regelbarkeit der aLT, im Vergleich zur aWT; zumindest auf Grundlage der hier verwendeten einfachen Regelstrategien. Der Wirkungsgrad der aLT ist leicht höher und es kommt zu einer deutlich geringeren Übertemperaturung des Raumes, damit ist im Endeffekt der Nutzungsgrad besser bzw. auch die Regelgüte besser, als bei der aWT mit vergleichbaren Vorlauftemperaturen.

Im überkompensatorischen Betrieb ist der Deckungsanteil der aLT bei gleicher Vorlauftemperatur etwas geringer als bei der aWT, wobei dieser Vergleich irreführend ist, da das Referenzgebäude mit 156 m² aWT belegt wurde, aber nur mit 12 m² aLT (entsprechend der Auslegung auf den Luft-Volumenstrom). Umgekehrt ausgedrückt kann über die aLT etwa sechs bis sieben Mal so viel Energie übertragen werden wie bei der aWT, bezogen auf einen Quadratmeter (Fassaden)Fläche und bei gleichem spezifischem Massenstrom. Für die aWT und Gebäude SFH45 können mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 25°C rund 41 kWh/(m²a) über die thermisch aktive Schicht übertragen werden (bei der angesetzten Regelung). Bei der aLT werden bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 25°C rund 268 kWh/(m²a) an die Wand und die Luft (im Luftspalt) übertragen. Dementsprechend fällt auch der Pumpenstrom bei der aLT wesentlich weniger ins Gewicht. Zwar hat die aLT lange Laufzeiten, jedoch eine deutlich geringere Fläche als die aWT. Daraus ergibt sich ein geringerer Pumpenstrombedarf.

Im (teil)kompensatorischen Betrieb ist der Deckungsanteil der aLT hingegen sogar höher als bei der aWT, trotz der deutlich geringeren Fläche. Dies liegt an dem Lüftungsanteil der aLT, der bereits mit deutlich niedrigeren Temperaturen zu einer Zuluft-Vortemperaturierung führt.

Tabelle 39: Simulationsergebnisse der aLT für konstante Vorlauftemperaturen für SFH45 (aLT-Fläche 12 m²)

Kennwert	Einheit	TVL_1 7	TVL_2 0	TVL_2 5	TVL_3 0	TVL_3 5	TVL_4 0
$Q_{w,aLT}$	kWh/a	1591	2234	3214	4103	4895	5552
t_{aLT}	h/a	4307	4192	4004	3842	3718	3564
$W_{P,aLT}$	kWh/a	19	18	17	17	16	15
$Q_{H,Rest}$	kWh/a	4571	3994	3109	2303	1591	1021
η_{aLT}	%	97	97	97	97	97	97
ε_{aLT}	%	94	93	92	92	92	91
δ_{aLT}	%	26	36	51	64	75	84
RG_{aLT}	%	25	34	48	61	71	79

Für hohe Deckungsgrade werden jedoch sehr hohe Vorlauftemperaturen benötigt, auch deutlich höhere als bei der aWT in Kapitel 1.8.2.4. Dies liegt an der geringen Fläche der aLT. Für einen monovalenten Betrieb müssten die gesamten Wärmeverluste des Gebäudes entweder über die 12 m² Wandtemperierung oder über den Zuluft-Wärmestrom abgedeckt werden. In diesem Fall handelt es sich nicht mehr um eine Flächentemperierung mit großen Flächen, sondern um eine Art Luftheizung, mit kleinem Wandtemperierungs-Anteil. Auch mit 12 m² kann die aLT als monovalentes Heizsystem betrieben werden, dann sind jedoch maximale Vorlauftemperaturen deutlich über 40°C notwendig.

Vergleich aWT – aLT für konstante Vorlauftemperaturen

In Abbildung 78 ist ein Vergleich des spezifischen Wärmeeintrags, bezogen auf die thermisch aktivierte Fassadenfläche, über die konstanten Vorlauftemperaturen für aWT (156 m²) und aLT (12 m²) aufgetragen. Zu erkennen ist, dass bereits mit niedrigen Vorlauftemperaturen in der aLT Wärme (an die Luft) übertragen werden kann. Hier ist der Lüftungsanteil der aLT erkennbar, da der Luftspalt auch als zusätzliche Wärmeübertragungsfläche betrachtet werden kann. Somit liegt der spezifische Wärmeeintrag bei der aLT deutlich höher als bei der aWT, vor allem im teilkompensatorischen Betrieb. Zusätzlich werden bei der aLT auch bei hohen Vorlauftemperaturen noch hohe Werte für den Nutzungsgrad erreicht. Dies verdeutlicht nochmal die bessere (schnellere) Regelbarkeit der aLT, im Vergleich zur aWT.

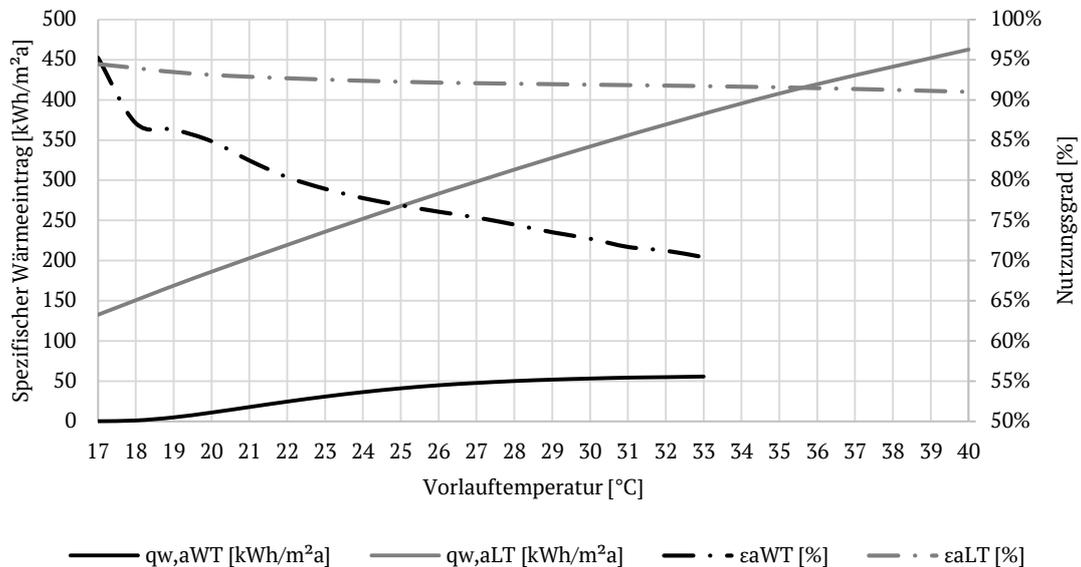


Abbildung 78: Vergleich des spez. Wärmeeintrags für aWT und aLT [kWh/m²a] und des Nutzungsgrades [%] für konstante Vorlauftemperaturen im Gebäude SFH45

Ergebnisse mit Kennlinien

Als Beispiel für eine Kennlinie wurde eine Variante mit außentemperaturabhängiger Vorlauftemperaturregelung (zwischen 21 und 35°C) für die aLT simuliert. Ziel der Kennlinie ist eine nahezu konstante Zulufttemperatur zu erreichen. Entsprechend *Abbildung 79* gelingt dies im Winter relativ gut und es werden konstante Zulufttemperaturen um 18°C erreicht. Problematisch werden die Zulufttemperaturen eher im Übergangsbereich zwischen Heizperiode und Kühlperiode. Durch höhere Raumtemperaturen wird die aLT hier öfter ausgeschaltet und kann die Zulufttemperatur in diesen Zeiten nicht mehr anheben. Dabei handelt es sich aber um ein Regelungsproblem, das lösbar ist. Für eine solche Kennlinie wird ein Deckungsanteil von rund 60% erreicht, bei einem Nutzungsgrad von 91%.

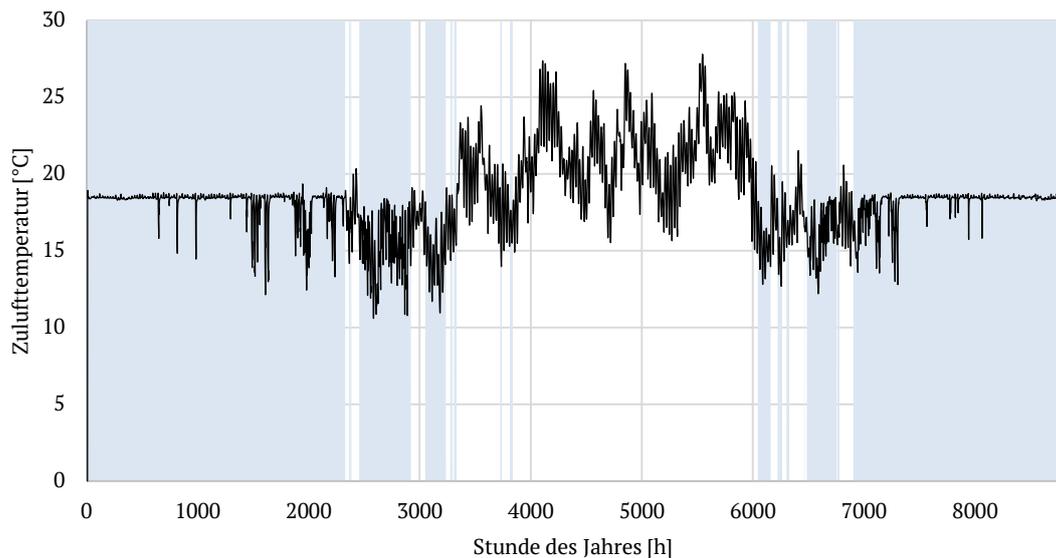


Abbildung 79: Zulufttemperatur für die Variante mit einer außentemperaturabhängigen Vorlauftemperaturregelung der aLT (zwischen 21 - 35°C). Der Zeitraum der Heizperiode ist blau hinterlegt

1.8.4.4 Fazit „Simulationen aLT“

Die Zuluftführung durch einen Luftspalt in der Bestandswand hat für den Einsatz der Wandtemperierung (entsprechend dem Konzept der aWT und aLT) einen ganz generellen Vorteil: Durch die Vorwärmung sinken die Lüftungswärmeverluste auf Kosten einer Erhöhung der Transmissionswärmeverluste. Diese können jedoch über die Wandtemperierung eingebracht bzw. ausgeglichen werden. Insofern vereinfacht die Luftführung durch die thermische Hülle die Heizaufgabe für die aWT/aLT.

Betrachtet man sich den Vergleich von aLT und aWT, so wird erkenntlich, dass die aLT vor allem im teilkompensatorischen Betrieb eines bivalenten Systems eine sehr interessante Rolle spielen kann. Mit Hilfe der aLT können noch niedrigere Vorlauftemperaturen nutzbar gemacht werden (siehe z.B. Wärmeeintrag bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 17°C in *Tabelle 39*). Somit handelt es sich bei der aLT aus energetischer Sicht um eine niederexergetische Ergänzung und Erweiterung der aWT.

Entsprechend der Theorie der aLT in 1.1 ergänzt die aLT die träge Wandtemperierung sehr gut, was zu einer guten Regelbarkeit mit geringen Übertemperaturen führt. Vor allem reagiert die aLT wesentlich schneller auf das Regelsignal, daher erscheinen „einfachere“ Lösungen bzgl. der Regelung ausreichend. Insgesamt betrachtet ist die aLT somit deutlich besser regelbar. Dies lässt sich an den höheren Werten für die Regelgüte in *Tabelle 39* (im Vergleich zu reinen aWT bei konstanten Vorlauftemperaturen) und an den hohen Nutzungsgraden in *Abbildung 78* ablesen.

Die aLT entsprechend der Modellierung in Schmidt (2019) bietet sich vor allem für einen bivalenten Betrieb an, mit dem Fokus auf den Lüftungswärmeverlusten. Eine Regelung der Vorlauftemperatur in Bezug auf eine konstante (behagliche) Zulufttemperatur erscheint sinnvoll. Der Rest-Wärmebedarf könnte über das sekundäre Heizsystem abgefahren werden, welches z.B. die aWT sein könnte. Gegen einen monovalenten Betrieb bei einer kleinen aLT-Fläche sprechen auch die daraus resultierenden hohen Zulufttemperaturen. Großer Vorteil der aLT ist die mögliche (Über)Kompensation der Lüftungswärmeverluste, mit gleichzeitiger (Über)Kompensation der Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen.

Wichtigster Punkt in Bezug auf das aktuelle Konzept der aLT ist jedoch die Integration einer Wärmerückgewinnung. Dies kann innerhalb der aLT (Luftspalt) erfolgen oder als zentrale

Wärmerückgewinnung über die Abluft. Bisher handelt es sich bei der aLT um eine reine Zuluft-Temperierung, ohne weitergehende Betrachtung der Abluft. Ein sinnvolles Systemkonzept unter Einsatz der aLT sollte die Abluftbetrachtung bzw. eine Wärmerückgewinnung jedoch integrieren. Zusätzlich spielt die Kühlung der Zuluft in der Kühlperiode eine wesentliche Rolle für die aLT. Dieses Potential wurde hier nicht betrachtet. In Bezug auf sinnvolle Systemkonzepte ist auch die Möglichkeit der Nachtkühlung in der Kühlperiode zu betrachten (Kurzschlussfunktion unter Umgehung des Wärmetauschers „Bestandswand“).

Auch sollte eine weitergehende Betrachtung der thermischen Behaglichkeit in Zusammenhang mit der aLT erfolgen. Diese wurde hier ausgeklammert, da bei einer mechanischen Lüftung eine Vielzahl weiterer Faktoren zu beachten sind (Position des Zuluft-Einlasses, Temperatur und Geschwindigkeit der Zuluft...), die im Rahmen der vereinfachten Potentialstudien nicht betrachtet werden können.

Die hier dargestellten Ergebnisse der aLT beziehen sich auf den hygienischen Luftbedarf des Gebäudes und sind nicht auf andere Strömungsverhältnisse übertragbar.

1.8.5 Simulationen mit außenliegender Wand- und Lufttemperierung

Die Kombination von aWT und aLT nutzt die Simulationsumgebung aus Kapitel 1.8.3 und 1.8.4. Durch die Integration der aLT mit einer Fläche von 12 m² liegt die Belegungsfläche der aWT „nur“ noch bei 144 m². Trotzdem bleibt das Gebäude mit 156 m² Wandtemperierung belegt, nur dass 12 m² davon zusätzlich durch einen Luftstrom aktiviert und als aLT definiert werden.

Bei der Kombination aus aWT und aLT handelt es sich um einen monovalenten Ansatz. Ziel der Kombination sollte eine komplette Abdeckung des Heizwärmebedarfs des Gebäudes sein. Trotzdem sollen auch die Ergebnisse im (teil)kompensatorischen Betrieb, vor allem als Vergleich, aufgeführt und ausgewertet werden. Entsprechend der Simulationsergebnisse für die aLT wird sich auf die Gebäudevariante SFH45 fokussiert.

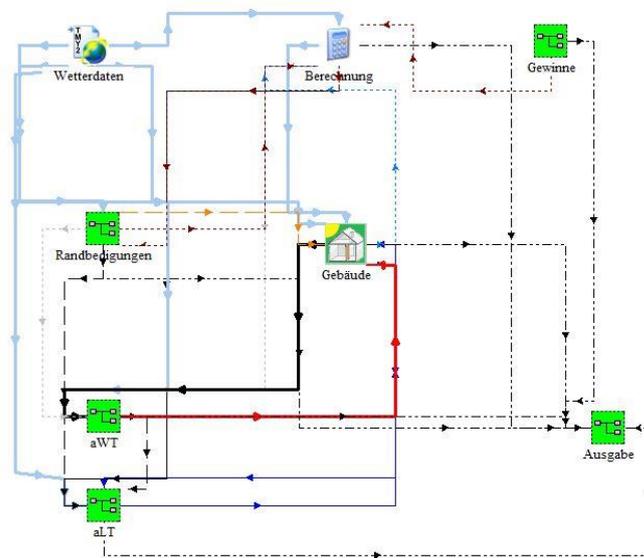


Abbildung 80: Screenshot des Simulations Studios aus TRNSYS für die kombinierte Simulation von aWT und aLT

1.8.5.1 Simulationen mit konstanten Vorlauftemperaturen für die Kombination von aWT und aLT

Bei diesen Simulationen werden die aWT und die aLT mit der gleichen konstanten Vorlauftemperatur betrieben. Der Luft-Volumenstrom durch die aLT ist in der Simulation permanent aktiviert, unabhängig vom Sole-Volumenstrom. Der Sole-Volumenstrom durch die Kapillarrohrmatten der aWT und der aLT wird entsprechend der in Kapitel 1.8.3 und 1.8.4 beschriebenen Bedingungen aktiviert bzw. deaktiviert.

Energetische Größen und Kennwerte

Betrachtet man sich die Simulationsergebnisse für SFH45 in Abbildung 81, so können die folgenden Beobachtungen festgehalten werden:

- Bereits mit Vorlauftemperaturen um 25°C wird ein Deckungsanteil (δ_{aWT_aLT}) von ca. 100% erreicht.
- Im kompensatorischen Betrieb, mit einer Vorlauftemperatur von 20°C, wird ein Deckungsanteil von rund 60% erreicht. Im teilkompensatorischen Betrieb mit 17°C Vorlauftemperatur wird noch ein Deckungsanteil von rund 30% erreicht.
- Der Nutzungsgrad (ϵ_{aWT_aLT}) liegt im teilkompensatorischen Betrieb bei maximal 93% und im überkompensatorischen Betrieb bei knapp unter 80%.
- Die Regelgüte (RG_{aWT_aLT}) erreicht im überkompensatorischen Betrieb Werte knapp unter 90%.
- Während die, über die aWT eingebrachte Wärme ($Q_{w,aWT}$), einen nahezu linearen Verlauf über die Vorlauftemperaturerhöhung aufweist, wird für die, über die aLT eingebrachte Wärme ($Q_{w,aLT}$), ein Maximum im kompensatorischen Betrieb erreicht.
- Im (teil)kompensatorischen Betrieb wird über die aLT wesentlich mehr Wärme in den Wandquerschnitt eingebracht, als über die aWT ($Q_{w,aLT} \gg Q_{w,aWT}$).
- Im überkompensatorischen Betrieb wird über die aWT mehr Wärme eingebracht, als über die aLT ($Q_{w,aLT} < Q_{w,aWT}$).

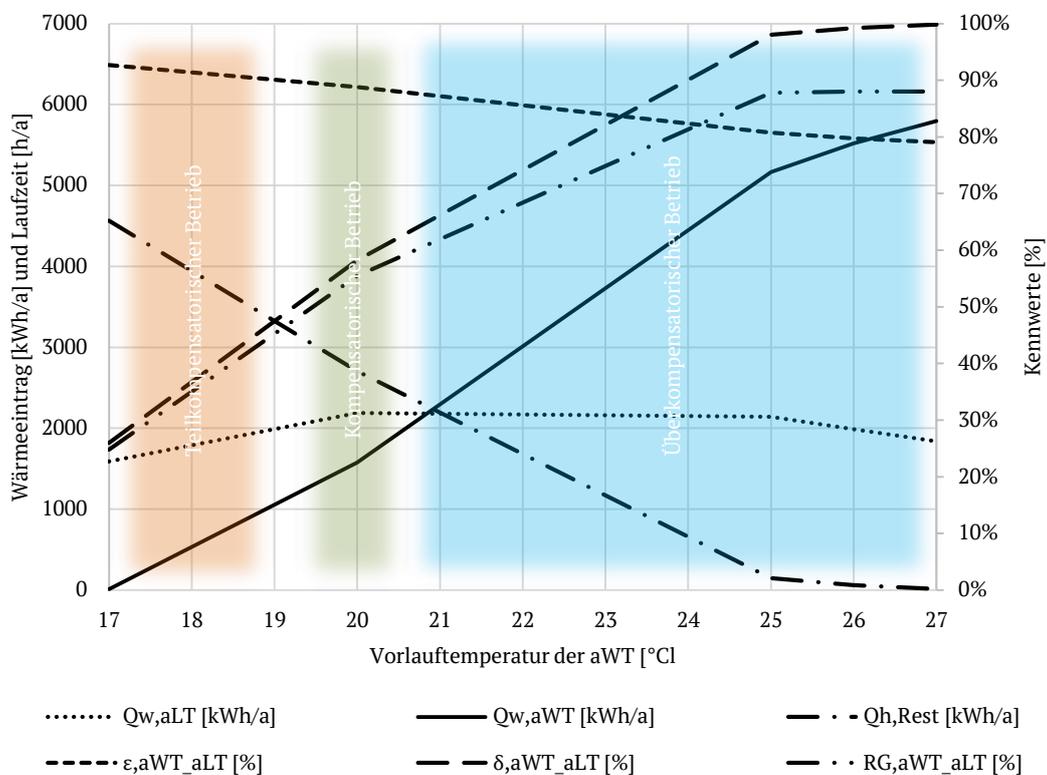


Abbildung 81: Simulationsergebnisse für die Kombination von aWT und aLT und konstante Vorlauftemperaturen zwischen 17 und 27°C; SFH45

Laufzeiten und Hilfsenergien

Bei Betrachtung der Laufzeiten und Hilfsenergien in Abbildung 82 fällt vor allem die unterschiedliche Laufzeit von aLT und aWT auf. Während das Maximum der Laufzeit der aLT im teilkompensatorischen Betrieb liegt (17°C), liegt das Maximum der Laufzeit der aWT im kompensatorischen Betrieb (20°C). Dies hängt mit der hinterlegten Regelung zusammen. Da die aLT niedrigere Vorlauftemperaturen zur Temperierung der Zuluft nutzbar machen kann, würde die aWT bei diesen niedrigen Temperaturen der Wand oft Wärme entziehen (wenn Vorlauftemperatur kleiner als Ruhetemperatur). Daher weist die aLT bei den niedrigen Vorlauftemperaturen deutlich höhere Laufzeiten auf. Ab dem kompensatorischen Betrieb ist die Laufzeit der beiden Komponenten gleich, da diese abhängig von der Raumtemperatur ist und beide Komponenten identisch über die Raumtemperatur geregelt sind. Durch den höheren thermischen Input der aLT, bei niedrigen Vorlauftemperaturen, ist der Pumpenstrombedarf für die thermische Aktivierung bei der Kombination der beiden Komponenten weniger relevant. Es wird maximal ein Verhältnis von 5% erreicht, maßgeblich „verursacht“ durch die hohe Laufzeit der aWT im kompensatorischen Betrieb. Im überkompensatorischen Betrieb liegt das Verhältnis eher in der Größenordnung 1-2%.

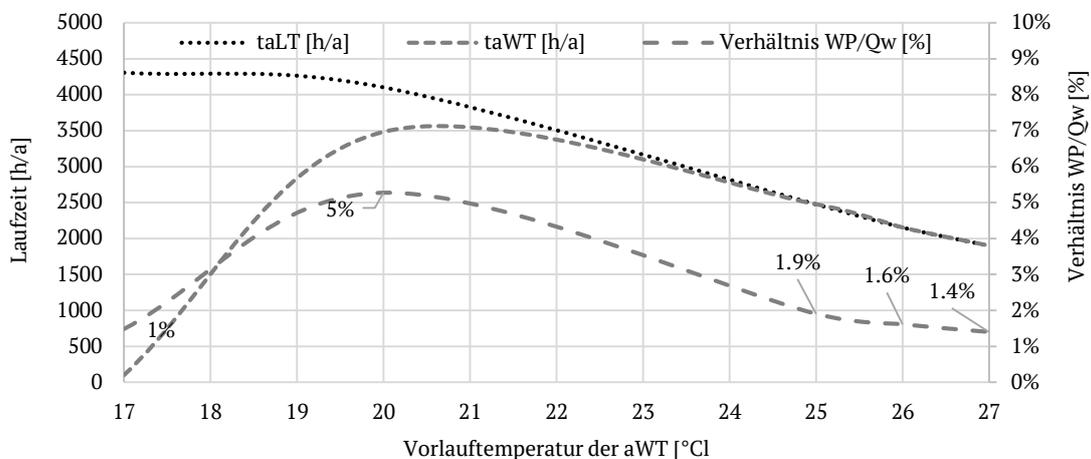


Abbildung 82: Laufzeiten für aLT (taLT) und aWT (taWT) über die Vorlauftemperatur aufgetragen. Zusätzlich ist das sich daraus ergebende Verhältnis von Pumpenstrombedarf (WP) zum thermischen Input (Qw) der beiden Komponenten dargestellt

Komfort

In Abbildung 11 ist die Auswertung der thermischen Behaglichkeit für die Kombination von aLT und aWT, auch im Vergleich zur Referenz-Variante (mit idealer Heizung) dargestellt. Eine weitergehende Analyse der Ergebnisse soll nicht erfolgen, siehe Begründung in Kapitel 1.8.4.

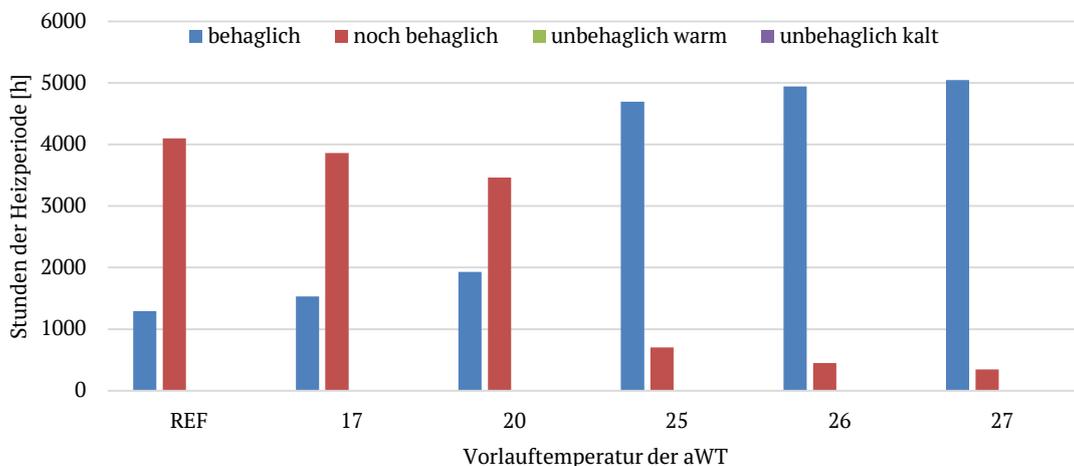


Abbildung 83: Auswertung der thermischen Behaglichkeit der Kombination aus aLT und aWT für konstante Vorlauftemperaturen und SFH45; zusätzlich ist die Referenz-Variante (REF) dargestellt

Vergleich und Auswertung für SFH45

Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit konstanten Vorlauftemperaturen für die aWT und die Kombination von aWT und aLT können die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Vortemperierung der Zuluft bewirkt eine Absenkung der notwendigen Vorlauftemperatur für den monovalenten Betrieb. Für die aWT alleine wird eine Vorlauftemperatur von 33°C für einen Deckungsanteil von 100% benötigt. Durch die Kombination mit der aLT sinkt die notwendige Vorlauftemperatur für einen Deckungsanteil von 100% auf 27°C.
- Gleichzeitig werden beim monovalenten Betrieb der Kombination von aWT und aLT bessere Nutzungsgrade und, im Endeffekt, auch eine bessere Regelgüte erzielt. Dies resultiert aus dem schnelleren Ansprechverhalten der aLT. Auch mit der einfachen Regelstrategie kommt es zu einer geringeren Übertemperierung. Der energetische Mehraufwand (bei der hier genutzten Regelung) für einen Deckungsanteil von 100% liegt bei der aWT bei rund 40%. Bei der Kombination von aWT und aLT reduziert sich der Mehraufwand auf ca. 25%, daran ist nochmal die bessere („einfachere“) Regelbarkeit erkennbar.
- Bezogen auf die thermische Behaglichkeit erhöht der Betrieb der aLT nochmal die „behaglichen“ Stunden durch die Zuluft-Vorwärmung. Bezogen auf den monovalenten Betrieb treten bei der Kombination von aLT und aWT (27°C Vorlauftemperatur) mehr „behagliche“ Stunden auf, als bei der aWT (33°C Vorlauftemperatur). Auch hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit bietet die Kombination der beiden Komponenten somit Vorteile.

1.8.5.2 Fazit „Kombination von aWT und aLT“

Die Ergebnisse des Simulationslaufs zeigen die Potentiale der Kombination der beiden Komponenten auf. Durch die Kombination können hohe Deckungsgrade mit niedrigen Vorlauftemperaturen und mit sehr guten Nutzungsgraden erreicht werden. Der Vorteil der aLT ist der hohe Wärmeeintrag bereits im (teil)kompensatorischen Betrieb. Der Vorteil der aWT ist hingegen die große Fläche und der dadurch mögliche Wärmeeintrag mit niedrigen Temperaturdifferenzen zur Raumluft.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass durch die Kombination von aWT und aLT die komplette Beheizung des Gebäudes über die Außenfassade möglich ist. Der Vorteil der Kombination liegt in niedrigen Vorlauftemperaturen und einer guten Regelbarkeit. Das Gebäude wäre somit minimalinvasiv, von außen, sanierbar und komplett temperierbar, mit der Möglichkeit der Nutzung von Wärmequellen auf sehr niedrigem Temperaturniveau.

Tabelle 40: Beobachtungen und Auswirkung der Kombination von aWT und aLT

Beobachtung	Auswirkung
Reduzierung der Laufzeit der aWT im überkompensatorischen Betrieb	Geringerer Pumpenstrombedarf und einfachere Regelbarkeit ¹⁴
Zuluft-Vorwärmung macht niedrigere Vorlauftemperaturen nutzbar	Höhere Deckungsanteile der Kombination von aWT und aLT auch bei niedrigen Vorlauftemperaturen
Reduzierung der notwendigen Vorlauftemperatur für 100% Deckungsanteil	Begünstigung des niederexergetischen Ansatzes
Hohe Nutzungsgrade der Kombination von aLT und aWT bei hohen Deckungsanteilen.	Erhöhung der Regelgüte → einfachere Regelstrategien erscheinen nutzbar

Der kombinierte Betrieb der beiden Komponenten bedarf weiterer Untersuchungen, vor allem hinsichtlich kombinierter Kennlinien. Ein sinnvoller Betriebsmodus scheint ein Grundlastbetrieb der aWT und die Spitzenlastabdeckung über die aLT, aber in den Grenzen der thermischen Behaglichkeit (Zulufttemperaturen und Oberflächentemperaturen). Für solche

¹⁴ Strombedarf des Ventilators der aLT wird hier nicht betrachtet.

Kennlinien wurde eine nochmal bessere Regelgüte, im Vergleich zu der Regelgüte der konstanten Vorlauftemperaturen, ermittelt. So könnte die aLT im Grundlastbetrieb mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen laufen (z.B. Rücklauf der aWT) und zu Spitzenlastzeiten durch die schnelle Regelbarkeit die Spitzenlast mit höheren Vorlauftemperaturen „abfahren“. Damit könnte die aWT im Grundlastbetrieb verbleiben.

1.8.6 Fazit „Gebäudesimulation“

Die aWT kann lagebedingt die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen kompensieren. Dementsprechend sinkt der Heizwärmebedarf des Gebäudes um den entsprechenden Anteil. Soll eine darüber hinaus gehende Überkompensation der Transmissionswärmeverluste erfolgen, mit dem Ziel weitere Wärmeverluste des Gebäudes abzudecken, steigt die Regelungsschwierigkeit der aWT, durch die große Trägheit mit der notwendigen Vorlauftemperatur deutlich an. Je geringer der Heizwärmebedarf des Gebäudes (über die Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen hinaus), desto geringer ist dieser Effekt. Umgekehrt zeigen die Simulationen jedoch auch, dass eine Beheizung aller untersuchten Gebäude über die aWT im monovalenten Ansatz möglich ist.

Für Gebäude mit einem geringen Heizwärmebedarf (in den Simulationen repräsentiert durch die Variante SFH15) kann die aWT als monovalentes System eingesetzt werden. Bei höheren Heizwärmebedarfen steigt die notwendige Vorlauftemperatur für hohe Deckungsanteile und damit die Anforderungen an die Regelung der aWT. Umgekehrt kann die aWT als Grundlasttemperierung beim bivalenten Ansatz sehr niedrige Fluidtemperaturen nutzbar machen und auch mit einfachen Regelstrategien genutzt werden.

Die aLT alleine, ausgelegt auf den hygienischen Luftwechsel, ist geeignet um den Heizwärmebedarf für ein zweites Heizsystem zu reduzieren (bivalenter Ansatz). Für den monovalenten Ansatz werden sehr hohe Vorlauftemperaturen benötigt, die nicht zum niederexergetischen Ansatz der Idee passen. Der Vorteil der aLT liegt gerade in der Nutzbarmachung niedriger Vorlauftemperaturen für die Zuluft-Vorwärmung. Zudem eignet sich die aLT durch die schnelle Regelbarkeit auch für die Spitzenlastabdeckung eines bivalenten Systems.

In dieser Hinsicht ergänzt die aLT die aWT ideal. Einerseits kann die aLT die Lüftungswärmeverluste (über)kompensieren und reduziert somit die Heizlast für die aWT deutlich und andererseits kann die aLT die Spitzenlast abfahren. Beide Systeme alleine sind eher für einen kompensatorischen Betrieb (Fokus aWT: Transmissionswärmeverluste, Fokus aLT: Lüftungswärmeverluste) geeignet, mit entsprechend unterschiedlichen Auslegungskriterien. In der Kombination ergibt sich jedoch ein ganzheitlicher Ansatz, da der Rest-Heizwärmebedarf eines Gebäudes (nach Kompensation der Transmissionswärmeverluste der belegten Flächen und (Teil)Kompensation der Lüftungswärmeverluste) so gering ist, dass geringe Übertemperaturen ausreichen, um eine komplette Beheizung zu realisieren. Dies zeigen auch die Simulationsergebnisse in diesem Kapitel.

Abschließend sollen die Fragen beantwortet werden, die am Anfang des Kapitels gestellt wurden:

-  Welche Deckungsanteile sind für die drei generellen Betriebsmodi (teilkompensatorisch, kompensatorisch und überkompensatorisch) erreichbar?

Tabelle 41: Übersichtlich erreichbare Deckungsanteile für die Variante SFH45

Komponente	teilkompensatorisch	kompensatorisch	überkompensatorisch
aWT	12%	42%	100%
aLT	30%	36%	100%
aWT + aLT	50%	60%	100%

-  Ist eine alleinige Temperierung des Gebäudes über die Komponenten (aWT & aLT), unter Verwendung von einfachen Regelstrategien, erreichbar (monovalenter Einsatz)?
Ja, alle betrachteten Gebäude können alleine durch die aWT oder aLT beheizt werden, mit der hier verwendeten Regelstrategie. Dem gegenüber steht jedoch ein thermischer Mehraufwand.

- Welche zusätzlichen Verluste/Mehraufwand tritt durch den Betrieb der aWT/aLT auf?
Mit der hier genutzten Regelung liegt der maximale thermische Mehraufwand (bei SFH45) in der Größenordnung von 40%. Dieser tritt bei monovalenten Betrieb der aWT mit konstanten Vorlauftemperaturen auf.
- Welcher Pumpenstrombedarf (Heizkreispumpe) steht dem thermischen Nutzen gegenüber?
Im überkompensatorischen Betrieb liegt das Verhältnis im Bereich um 1%.
- Wie verändern sich Raum- und Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenz-Variante?
Durch den Betrieb der aWT steigen insbesondere die Oberflächentemperaturen. In Kombination mit der aLT werden hohe Raum- und Oberflächentemperaturen erreicht.

1.9 Umsetzung Wärmeversorgungs-System

1.9.1 Konzept

Das generelle Konzept für das Versorgungssystem innerhalb des Projekts kann *Abbildung 84* entnommen werden. Die Auslegung der einzelnen Komponenten richtet sich dabei nach der Fläche der Wandtemperierung. Anhand der belegbaren Fläche wurden die Hydraulik und die weiteren Komponenten ausgelegt. Details hierzu können Kapitel 1.9.2 entnommen werden. Die einzelnen Komponenten werden in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

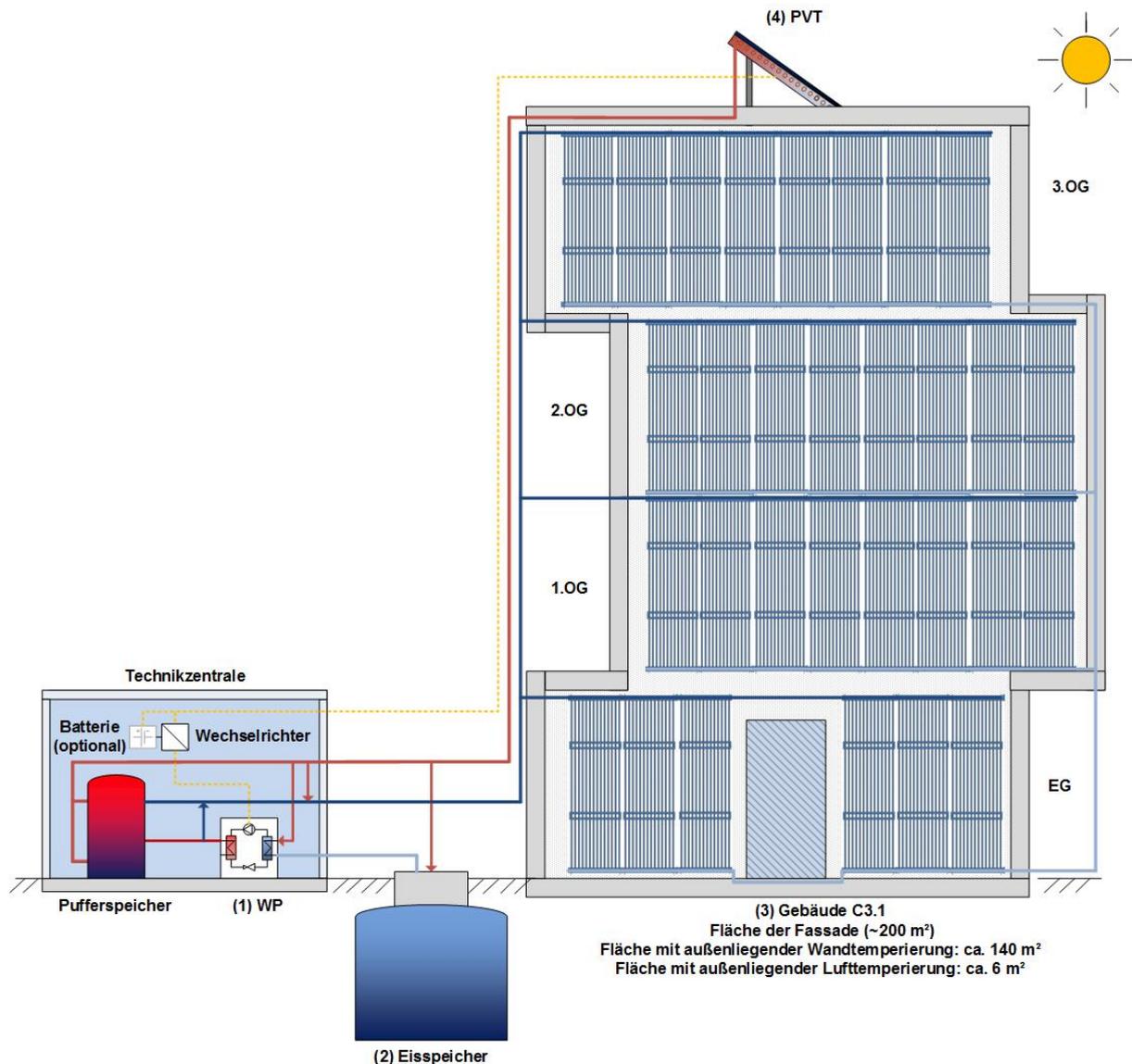


Abbildung 84: Konzept für das Versorgungssystem der Wand- und Lufttemperierung (3) unter Nutzung einer Wärmepumpe (1), eines Eisspeichers (2) und von PVT-Hybridkollektoren.

1.9.1.1 Idee

Die Idee hinter dem Versorgungssystem war die Nutzung eines möglichst niederexergetischen Versorgungssystems, das für den Heiz- und Kühlbetrieb geeignet sein soll. Niederexergetisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass mit möglichst geringen Temperaturdifferenzen gearbeitet werden soll und z.B. hohe Vorlauftemperaturen vermieden werden sollen.

In einem der Arbeitspakete von LEXU II war von Anfang an der Einsatz der außenliegenden Wandtemperierung zusammen mit einer Wärmepumpe, einem Eisspeicher (bei Projektstart war ein Projektpartner ISOCAL HeizKühlsysteme GmbH; diese wurde in der Zwischenzeit von der Viessmann Group übernommen) und einem Putzabsorber geplant. Da der in diesem Arbeitspaket geplante Demonstrator nicht realisiert werden konnte, sollte dieses Versorgungssystem für den umgesetzten Demonstrator übernommen werden. Da jedoch zeitgleich einige Forschungsprojekte zum Thema „Putzabsorber“ publiziert wurden und über die Viessmann Group der Kontakt zu einem Hersteller von PVT-Kollektoren hergestellt wurde, wurde im Projektkonsortium, zusammen mit dem Projektträger entschieden auf den Putzabsorber zugunsten von PVT-Kollektoren zu verzichten. Somit konnte der Wandaufbau auf eine aktive Schicht vereinfacht werden. Aus diesen Ansätzen ergibt sich das grundsätzliche Konzept des Versorgungssystems, siehe *Abbildung 85*. Als Wärmeerzeuger kommt eine Wärmepumpe zum Einsatz. Wärmequelle für die Wärmepumpe ist ein Eisspeicher, der durch PVT-Kollektoren regeneriert wird. Auf der Wärmesenkenseite befinden sich die Heizkreise der Feldtestfläche. Diese Konfiguration ermöglicht das Betreiben der Wandtemperierung über die Wärmepumpe unter Nutzung des Eisspeichers als Wärmequelle. Die Regeneration des Eisspeichers erfolgt durch die PVT-Kollektoren und das umgebende Erdreich.

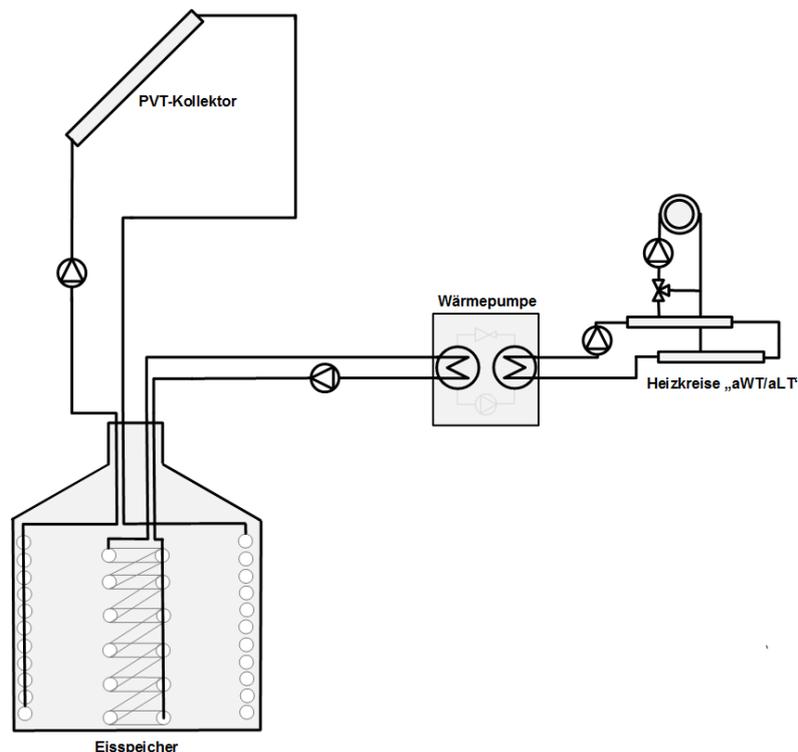


Abbildung 85: Grundsätzliches Konzept des Versorgungssystems für die außenliegende Wand- und Lufttemperierung

1.9.1.2 Heizen

Neben dem in *Abbildung 85* dargestellten Betriebsmodus sollten jedoch noch weitere Betriebsmodi (insbesondere aus niederexergetischen Gesichtspunkten) ermöglicht und untersucht werden. Nach Diskussion mit den Projektpartnern und unter Einbeziehung eines externen Planers wurde das Konzept aus *Abbildung 85* überarbeitet und zu dem Konzept aus *Abbildung 86* erweitert.

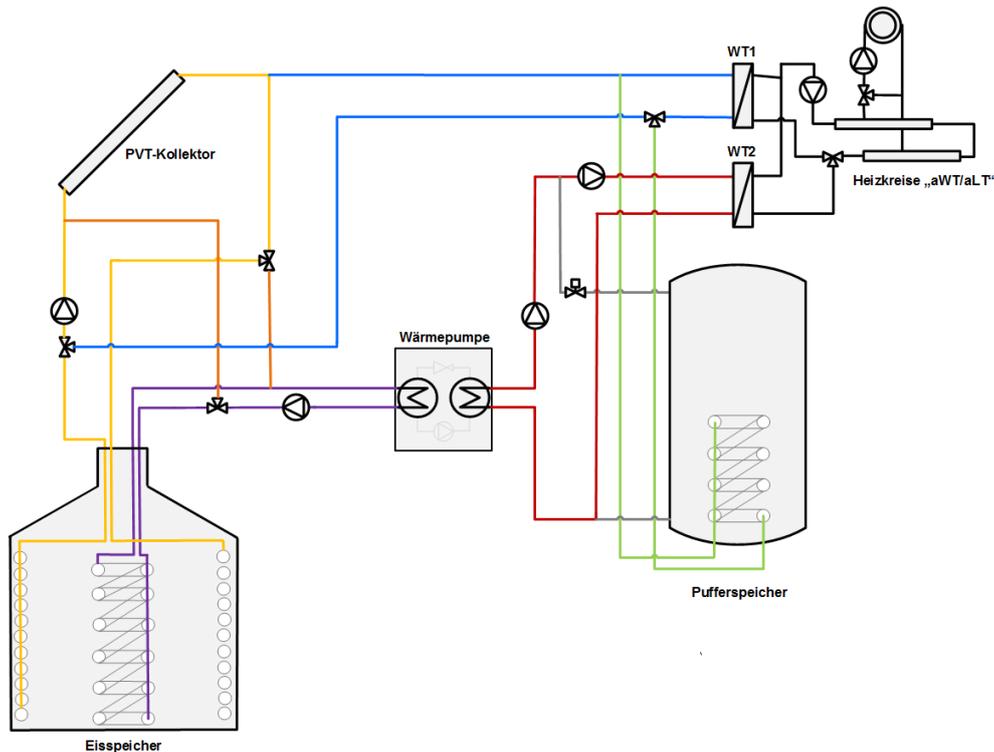


Abbildung 86: Erweitertes Konzept zur Ermöglichung mehrere Betriebsmodi im Heizbetrieb

Die folgenden Einsatzmöglichkeiten für die einzelnen Komponenten ergeben sich entsprechend dem Konzept aus *Abbildung 86*:

- PVT-Kollektor:
 - Regeneration Eisspeicher
 - Wärmequelle für Wärmepumpe
 - Wärmequelle für Wandtemperierung
 - Zwischenspeicherung im Pufferspeicher
- Eisspeicher:
 - Regeneration durch PVT
 - Wärmequelle für Wärmepumpe
- Wärmepumpe:
 - Wärmequelle für Wandtemperierung
 - Zwischenspeicherung im Pufferspeicher
- Pufferspeicher: Der Pufferspeicher wird als Zwischenspeicher für die Wärme aus der Wärmepumpe und aus den PVT-Kollektoren eingesetzt. Es handelt sich um einen Niedertemperatur-Wasserspeicher.

1.9.1.3 Kühlen

Aktives Kühlen

Einer der Vorteile des Einsatzes von Wärmepumpen als Wärmeerzeuger ist deren generelle Eignung für den Heiz- und Kühlbetrieb. Durch eine Umkehr der Flussrichtung des Kältemittels in der Wärmepumpe kann eine Wärmepumpe auch als aktiver Kälteerzeuger genutzt werden. Dies bezeichnet man als „aktives Kühlen“. Eine interne Umkehr der Flussrichtung des Kältemittels kann z.B. über ein 4-Wege-Ventil erreicht werden, in solchen Fällen spricht man von einer reversiblen Wärmepumpe. Ist dies nicht der Fall, müssen durch externe Umschaltungen die beiden Wärmetauscher der Wärmepumpe „getauscht“ werden. Hierfür bietet z.B. Viessmann die „AC-Box“ an. In dieser Box befindet sich eine Hydraulik, die im Kühlfall die Verschaltung der beiden Wärmetauscher ändert.

Passives Kühlen

Beim passiven Kühlen kommt kein aktives Kühlaggregat zum Einsatz, sondern es kommt eine natürliche Kältequelle direkt unter Nutzung der Umwälzpumpen zum Einsatz (z.B. Sole oder Grundwasser...). Passiv kühlen können nur Sole/Wasser-Wärmepumpen. Entsprechend dem Konzept oben könnte der Eisspeicher die Rolle der Kältequelle übernehmen. Eine Rückkühlung des Eisspeichers kann über Nacht über die PVT-Kollektoren erfolgen.

Da das passive Kühlen mit wesentlich weniger Aufwand (Hydraulik) realisiert werden kann, wurde beschlossen diesen Kühlmodus zu ermöglichen. Auf das aktive Kühlen wird in dem aktuellen Projekt somit verzichtet. Generell ist jedoch der nachträgliche Einbau z.B. einer AC-Box möglich, um auch den Betriebsmodus „aktive Kühlen“ zu ermöglichen.

Durch die Integration des passiven bzw. natürlichen Kühlens ändert sich das Schema des Konzeptes entsprechend *Abbildung 87*. Es wird ein weiterer Wärmetauscher als Verbindung zwischen primärem und sekundären Kreis und ein 3-Wege-Ventil benötigt.

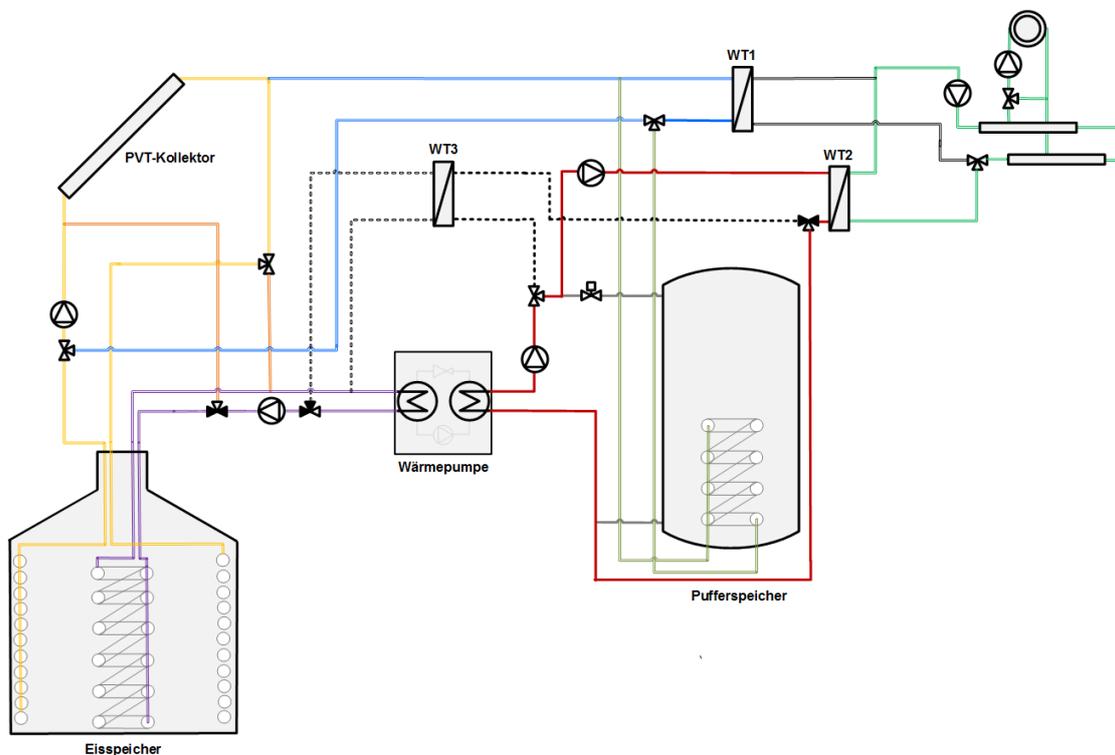


Abbildung 87: Konzept mit Ermöglichung des Betriebsmodus „passives Kühlen“

1.9.2 Auslegung

Die Ausgangsgröße für die Auslegung der Anlage ist die thermisch aktivierte Fläche der Feldtestfassade. Die Feldtestfassade wurde mit ca. 140 m² der außenliegenden Wand- und Lufttemperierung belegt (siehe Dokumentation, Teil I). Als maximale Heizleistung der Wandtemperierung wird ca. 40 W/m² angenommen, das entspricht einer Oberflächen-Übertemperatur von ca. 5 K. In Summe wird somit eine maximale Heizleistung von 5.600 W bzw. 5,6 kW benötigt. Entsprechend wurde eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer Heizleistung in dieser Größenordnung gesucht. Zum Einsatz kommt die Wärmepumpe VITOCAL 300-G mit einer Nenn-Wärmeleistung von 5,7 kW_{th} (B0/W35). Passend zu dieser Wärmepumpe wurde der entsprechende Eisspeicher der Viessmann Eis-Energiespeicher GmbH verbaut. Insgesamt beruht die Hydraulik und die Auslegung der Komponenten auf den Standardsystemen der Viessmann GmbH. Bzgl. der PVT-Kollektoren wurde die notwendige Fläche anhand der Kenndaten der Kollektoren, in Relation zu den Kenndaten der eigentlich hier vorhandenen Solar-Luftabsorber umgerechnet. Die Belegungsplanung des Flachdaches mit den PVT-

Kollektoren erfolgte unter Berücksichtigung der Windlasten (Randbereiche) und der Verschattung durch das nebenstehende Treppenhaus und einen vorhandenen UMTS-Mast, siehe Abbildung 88. Auch die Eigenverschattung der Module bei unterschiedlichen Abständen wurde untersucht, siehe Abbildung 89. Hier ist eine frühere Variante der Belegungsplanung dargestellt, zusätzlich zu der Verschattung durch das Treppenhaus findet hier im Januar noch eine Verschattung der hinteren Modulreihe durch die vordere statt.

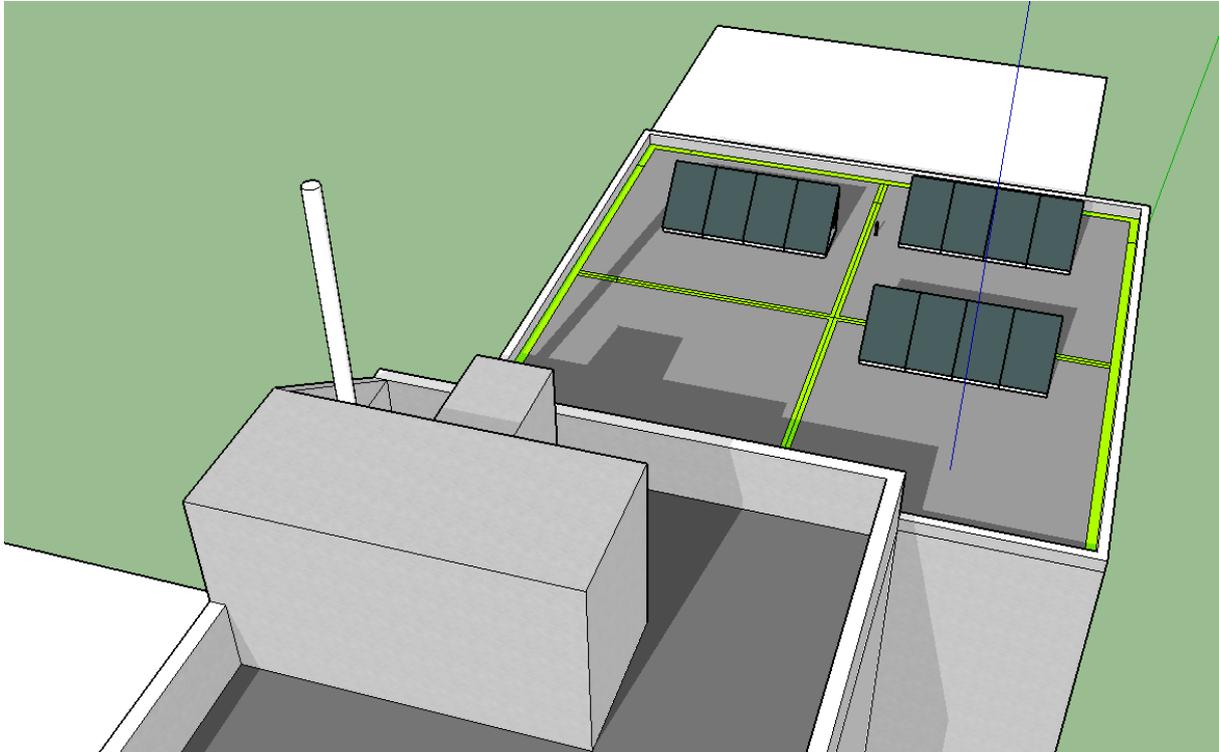


Abbildung 88: Verschattungsstudie des Daches mit den PVT-Kollektoren. Dargestellt ist die finale Belegungsplanung mit drei Strings zu je vier Kollektoren.

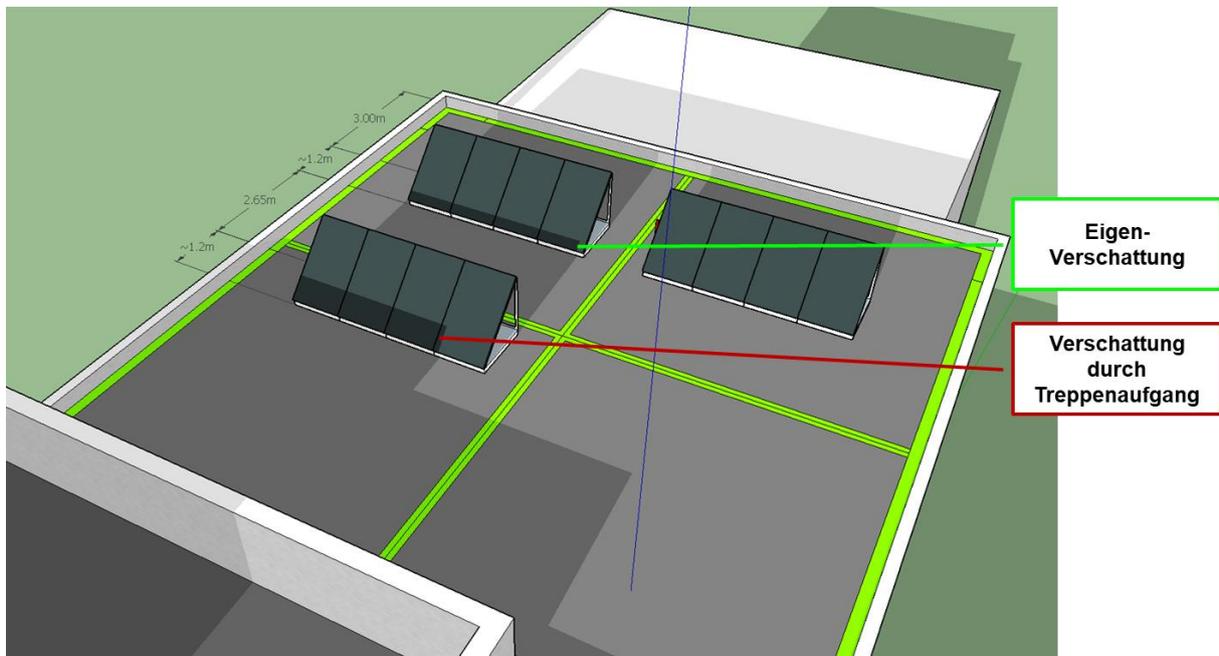


Abbildung 89: Eine der untersuchten Varianten der Belegungsplanung. Bei dieser Variante wurde im Januar zusätzlich eine Eigenverschattung festgestellt.

1.9.3 Beschreibung der Komponenten

1.9.3.1 PVT-Kollektoren

Es werden 12 unabgedeckte PVT-Hybridmodule der Firma KIOTO Photovoltaics GmbH eingesetzt, siehe *Abbildung 90*. Ein PV-Modul besteht aus 60 monokristallinen Zellen. Diese befinden sich hinter einer 3,2 mm dicken Solarglasplatte mit hochfester Antireflexbeschichtung. Hinter den PV-Zellen ist zur elektrischen Isolation eine Kunststoffschicht aus Ethylvinylacetat mit dem Absorber aus Aluminium verbunden. Auf diesem sind 9 Steigrohre aus Kupfer geschweißt, die zusammen mit den Sammelrohren den Harfenabsorber bilden, siehe *Abbildung 90*. Die Bruttofläche eines Moduls beträgt 1,66 m², was eine gesamte Bruttofläche von 19,92 m² ergibt. Das PV-Modul liefert unter Standardtestbedingungen (STC) laut Datenblatt eine Leistung P_{MPP} von 280 W, bei einer Spannung U_{MPP} von 30,93 V und einem Strom I_{MPP} von 8,99 A. Der Wirkungsgrad ist mit 16,94 % angegeben. Die maximale thermische Leistung beträgt $360 \frac{W}{m^2}$.

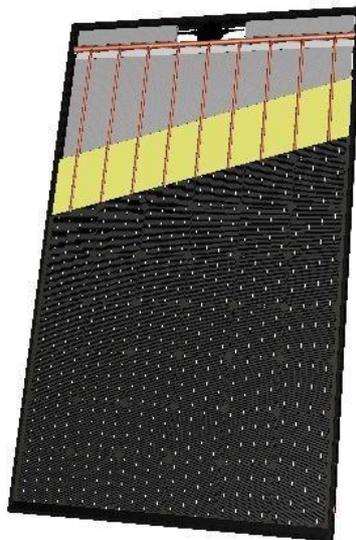


Abbildung 90: Schematischer Aufbau PVT Kolektor KIOTO Photovoltaics

Die Module sind auf dem Dach des Gebäudes C3.1 der Universität des Saarlandes zu je vier Modulen in Reihe geschaltet. Drei Modulreihen sind dabei parallel verschaltet, siehe *Abbildung 91*. Der Aufbau erfolgte auf Profilen mit einer fixen Neigung von 45°. Der Azimut-Winkel der Module beträgt dabei -7°.



Abbildung 91: Lage der PVT auf dem Dach des Gebäude C3.1 der Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Ursprünglich waren die Module mit einer rückseitigen Wärmedämmung versehen. Diese wurde entfernt, um die PVT besser als niederexergetische Wärmequelle für die eingesetzte Wärmepumpe nutzen zu können. Die drei Strings sind dazu mit einem Wechselrichter in der Technikzentrale verbunden und an das elektrische Energieverteilungsnetz angeschlossen. Die eingesetzten PVT Module sind als primäre Wärmequelle vorgesehen und sollen sowohl direkt über einen Wärmeübertrager als auch indirekt über die WP und den Eispeicher die Wärme für das Heizsystem liefern.

1.9.3.2 Eisspeicher

Der eingesetzte Eisspeicher ‚Zisterne‘ der Firma Viessmann Werke GmbH & Co KG, siehe Abbildung 92, hat ein Volumen von ca. 10 m³. Das Fassungsvermögen ist mit ca. 9,6 m³ angegeben.

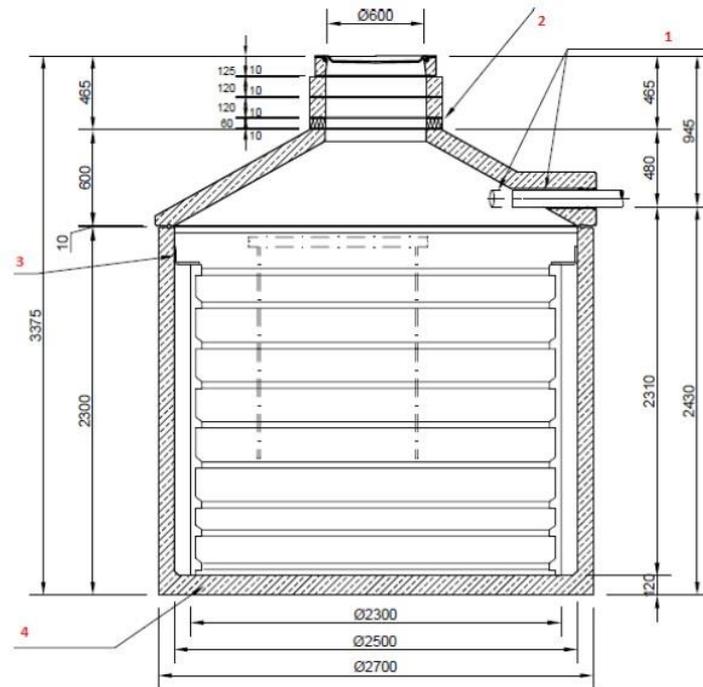


Abbildung 92: Schnitt Darstellung des für das Forschungsprojekt eingesetzten Eisspeichers und dessen Bemaßungen (1) Anschlussleitungen und Überlauf (2) Isolierring Dämmstoff (3) 4x Haltwinkel an Behälterwand (4) Stahlbetonbehälter mit Werkstoffgüte C35, Quelle: (Viessmann Werke GmbH & Co KG, 2014)

Der zylindrische Behälter, bestehend aus Stahlbeton, hat eine Höhe von 3,375 m und einen Durchmesser von 2,7 m. Er wurde vollständig, bis zum Abschluss Oberkannte, neben dem Gebäude ins Erdreich eingelassen. Die beiden eingesetzten Rohrbündelwärmetauscher bestehen aus Polyethylen-Rohren und sind mit Anschlussleitungen, welche unter der Erde vergraben sind, mit der Zentrale verbunden. Der Eisspeicher ist in der Heizperiode als sekundäre Wärmequelle für die Wärmepumpe vorgesehen, sowie als Wärmesenke für überschüssige Wärme aus den PVT Modulen, wenn die Energie aus diesen für die WP nicht ausreicht. Im Kühlbetrieb wird überschüssige Wärme in diesen geleitet.

1.9.3.3 Sole/Wasser Wärmepumpe

Die im Rahmen des Projekt LEXU II eingesetzte Sole/Wasser-Wärmepumpe, ist eine ‚Vitocal 300-G Typ 301.B 06‘ der Firma Viessmann GmbH & Co. KG, Allendorf, siehe Abbildung 93. Sie wird mit einer Nennwärmeleistung von 5,69 kW nach EN 14511 (B0/W35, 5K Spreizung) angegeben. Die Kälteleistung ist dabei 4,54 kW bei 0°C Eingangstemperatur am Kältekreis. Die Pumpe kann auf der Wärmequellenseite, auch primäre Seite genannt, von einer Wärmequelle im Temperaturbereich von -10°C bis +25°C betrieben werden. Sie schaltet sich automatisch ab, wenn diese Grenzen überschritten werden. Sekundärseitig, also an der Seite der Wärmesenke, kann die Vorlauftemperatur flexibel bis auf 65 °C eingestellt werden. Für den Einsatz als niederexergetisches System sind aber niedrigere Vorlauftemperaturen vorgesehen.



Abbildung 93: Eingesetzte Wärmepumpe Vitocal 300-G, Firma Viessmann GmbH & Co. KG

1.9.3.4 Pufferspeicher

Der im Projekt eingesetzte Pufferspeicher, in Abbildung 94 dargestellt, ist ein ‚Vitocell 140-E‘ von der Firma Viessmann GmbH & Co KG. Er hat ein Fassungsvermögen von 950 l und besitzt einen internen Wärmetauscher.



Abbildung 94: Im Projekt LEXU II eingesetzter Pufferspeicher Vitocell 140-E, Firma Viessmann GmbH & Co. KG

Der Pufferspeicher soll zum einen eingesetzt werden, um die Laufzeit der Wärmepumpe zu optimieren. Zum anderen ermöglicht er das Abfangen von Lastspitzen der Solaranlage sowie in Perioden von zu tiefer Quelltemperatur seitens der Solaranlage die Umschaltung auf die Wärmepumpe zu verzögern.

1.9.4 Wärmequellenmanagement

Das Wärmequellenmanagement wurde unter anderem im Rahmen einer Studienarbeit erstellt, siehe Murke (2019). Die entsprechende Studienarbeit ist im Anhang beigefügt. Dort können die Grundlagen des Wärmequellenmanagements und dessen Umsetzung entnommen werden.

1.9.5 Zusammenfassung und Ausblick „Wärmequellenmanagement“

Aufgabe und Zielstellung des Projekts war, ein Wärmequellenmanagement (WQM) in Verbindung mit PVT-Kollektoren, einem Eisspeicher und einer Wärmepumpe zu entwickeln. Dieses Management dient im Demonstrator als automatische Steuerung und Regelung der Wärmequellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf die Gewinnung von thermischer Energie, während der gleichzeitig erzeugte PV-Anteil (Strom) nur sekundär betrachtet wird. Im ersten Schritt wurde ein Konzept erarbeitet um die konkreten Schwerpunkte der Anlage, auf Basis einer theoretischen Untersuchung der beiden Wärmequellen, für ein WQM zu finden und zu untersuchen. Anhand der theoretischen Betrachtung und Berechnung war es möglich, jeweils einen wesentlichen unabhängigen Parameter für die beiden Wärmequellen zu erarbeiten. Diese sind für die PVT-Kollektoren und für den Eisspeicher jeweils der Wert für die potenzielle thermische Energie $Q_{PVT,pot}$ und $Q_{Eis,pot}$. Um die Parameter zu bestimmen, musste die Anlage in Teilen messtechnisch erfasst und ausgewertet werden. Die Messungen erfolgten dabei unter verschiedenen realen Bedingungen über verschiedene Messtage (Bewitterung). Bei der Umsetzung des WQM lag der Schwerpunkt auf einer möglichst einfachen und wenig problemfälligen Ausführung unter Berücksichtigung einer sicherheitstechnischen Betrachtung. In das Programm wurden neben den beiden bestimmten Parameter $Q_{PVT,pot}$ und $Q_{Eis,pot}$ eine Reihe wesentlicher Messdaten einbezogen, die kontinuierlich erfasst werden. Damit kann das WQM entscheiden, welcher Modus der aktuell energetisch sinnvollste für die gesamte Anlage ist. Des Weiteren wurden für eine Steuerung/Regelung der verbauten Pumpen weitere Messungen durchgeführt und die damit gewonnenen Parameter in das entwickelte WQM integriert. Das WQM läuft stabil und die Anlage wird auch über die Projektlaufzeit hinaus mittels des WQM geregelt. Dabei konnte in einer längeren Testphase festgestellt werden, dass die theoretischen Annahmen mit den praktischen Messungen im Wesentlichen übereinstimmen. Diese Übereinstimmung zeigt sich z.B. im real bestimmten thermischen Wirkungsgrad der PVT-Kollektoren im Bereich von 0,3-0,35. Im Vergleich dazu wurde nach einer In-Situ Messung und im Labor ein Wert von 0,34 ermittelt, siehe Eggert & Palm (2016). Die ermittelten Parameter $Q_{PVT,pot}$ und $Q_{Eis,pot}$ zeigten im Verlauf der mehrwöchigen Testphase, dass diese sinnvolle Ergebnisse und Schaltbedingungen ergeben. Dazu kommt, dass $Q_{PVT,pot}$ im realen Betrieb höher eingestellt wurde, als es erforderlich wäre. Dies soll im Fall, dass die PVT Module als Wärmequelle der Wärmepumpe dienen, die Schaltpunkte im Grenzfall auf einen anderen Modus verzögern und als Hysterese zwischen den beiden Wärmequellen arbeiten. Die berechneten theoretischen Werte für die PVT-Module für „Konvektion“ und „Kondensation“ lagen leicht über den gemessenen Werten. Allerdings wurden diese ohne Berücksichtigung des Wärmedurchgangs und -übergangs auf das Trägermedium betrachtet, weswegen diese im realen Verhältnis ebenfalls tiefer liegen sollten. Dazu kommt, dass der Einfluss der Windrichtung bei der konvektiven Wärmegewinnung nicht genauer untersucht werden konnte (Ausfall des entsprechenden Sensors). Diese Abhängigkeit könnte entsprechend noch in das WQM integriert werden. Das entwickelte WQM bietet für die Anlage einen intelligenten Ansatz die Effizienz der eingesetzten Wärmepumpe zu verbessern. Umgekehrt besitzt das umgesetzte WQM definitiv noch Verbesserungspotential. Somit ist eine weitere Steigerung der Effizienz der Wärmepumpe möglich. Dazu muss die Anlage weiter und über einen längeren Zeitraum ausgewertet und die Parameter angepasst werden.

Das WQM besitzt zudem bereits die Möglichkeit den Modus „natural cooling“ anzusteuern. Dieser Modus konnte jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr detailliert betrachtet bzw. ausgewertet werden. Dazu bedarf es weiterer Messungen und einer entsprechenden Validierung der Ergebnisse.

1.10 Zusammenfassung der Ergebnisse und Optimierungspotentiale

1.10.1 Umsetzung der Feldtestfassade

Aufgrund der Umsetzung der Feldtestfassade konnten die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

- Erfolgreiche Applikation der Wandtemperierung, entsprechend des erstellten Anbringungskonzepts und Schichtaufbaus.
- Über die Projektlaufzeit konnten keine Schäden an der Fassade festgestellt werden.
- Die Idee einer Sanierung „von außen“ konnte erfolgreich demonstriert werden.
- Die Umsetzung der Wandtemperierung an der Feldtestfassade wurde dokumentiert und in Form von mehreren Veröffentlichungen/Präsentationen/Veranstaltungen usw. einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.
- Mit Abschluss des Projekts steht eine Feldtestfassade mit Wand- und Lufttemperierung und umfangreicher MSR-Technik für weitere Untersuchungen zur Verfügung.
- Für die umgesetzte Variante und zwei optimierte Varianten konnten die Systemkosten ermittelt werden und zusammen mit den Projektpartnern eine Modellwand eines optimierten Schichtaufbaus erstellt werden. Die entsprechende Modellwand wird zu Ausbildungszwecken und als Präsentationsobjekt bei Messeauftritten usw. verwendet.

Das folgende Optimierungspotential konnte ermittelt werden:

- Die Schnittstellen bei der Anbringung der aWT sollten verringert werden. Umgekehrt ausgedrückt ist ein erhöhter Vorfertigungsgrad ein wichtiger Aspekt für die Anwendung der aWT. (Stichworte: erhöhter Vorfertigungsgrad, vorgefertigte Module, optimierter Schichtaufbau).
- Die aWT kombiniert die klassischen Gewerke „Heizung“ und „Fassade/WDVS/Stuck“. Für die Verbreitung der Idee und die Anwendung in der Baupraxis sollten Lösungen „aus einer Hand“ angeboten werden. Dies führt zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit und zu einer geringeren Fehleranfälligkeit. (Stichworte: Lösungen aus einer Hand; gewerkübergreifende Lösungen).
- Im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten konnte nur eine Fassade des Gebäudes saniert und mit aWT/aLT belegt werden. Zwar kann die Übertragung auf ganze Gebäude auf Simulationsebene erfolgen; der reale Nachweis an einem gesamten Gebäude ist jedoch noch ausstehend. Hierfür können die Erfahrungen der Feldtestfassade genutzt werden (Stichwort: Demonstrator).

1.10.2 Feldtestfassade der außenliegenden Wandtemperierung

Aufgrund der Umsetzung der Feldtestfassade konnten die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

- Die Leistungsdaten und Zeitkonstanten der Feldtestfläche konnten für typische Massenströme und Temperaturen im realen Betrieb ermittelt werden.
- Anhand von Vergleichen zwischen Messung und Simulation konnten mehrere Simulationsmodelle für die aWT validiert werden.
- Für zukünftige Umsetzungen kann die Sensorik anhand der Erfahrungen der Feldtestfläche konzipiert werden.

Das folgende Optimierungspotential konnte ermittelt werden:

- Bzgl. Schichtaufbau und Schnittstellen stimmt das Optimierungspotential mit dem aus Kapitel 1.10.1 überein.
- Das Temperaturprofil über die Kapillarrohrmatte konnte trotz umfangreicher Sensorik nicht final bestimmt werden. Zwar eignet sich die Mitteltemperatur für übliche Berechnungen und Abschätzungen, weitere Untersuchungen zum Temperaturprofil und Temperaturverlauf der Kapillarrohrmatten erscheinen jedoch sinnvoll.

1.10.3 Feldtestfassade der außenliegenden Lufttemperierung

Aufgrund der Umsetzung der Feldtestfassade konnten die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

- Die Leistungsdaten und Zeitkonstanten der Feldtestfläche konnten für typische Massenströme (wasser- und luftseitig) und Temperaturen im realen Betrieb ermittelt werden.
- Anhand von Vergleichen zwischen Messung und Simulation konnten zwei Simulationsmodelle für die aLT validiert werden.
- Die einströmende Luft konnte entsprechend der vorher ermittelten Größenordnung temperiert werden; somit konnten die theoretischen Betrachtungen der aLT verifiziert werden.
- Nach Abschluss des Projekts steht eine betriebsbereite Feldtestfläche für weitere Untersuchungen oder nachfolgende Projekte zur Verfügung.

Das folgende Optimierungspotential konnte ermittelt werden:

- Der Schichtaufbau der aLT muss optimiert und zu einem industriellen Produkt überführt werden. Beim dem derzeitigen Aufbau handelt es sich um einen Prototypen, mit Fokus auf energetischen Erkenntnissen.
- Die Sensorik muss, insbesondere für geringe Luftvolumenströme, überarbeitet werden. Diese sind mit der aktuell verbauten Sensorik nicht messbar.

1.10.4 Umsetzung des Wärmeversorgungssystems für die Feldtestfassade

Aufgrund der Umsetzung und des Betriebs der Hydraulik konnten die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

- Erfolgreicher Feldtestbetrieb der Kombination von Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Hybridkollektoren.
- Erarbeitung eines WQM auf Grundlage der Berechnung von Potentialen für die beiden installierten Wärmequellen (Kollektoren und Eisspeicher).
- Es konnte eine Sensorik ermittelt werden, mit welcher der Beladungszustand des Eisspeichers während der Vereisung kontinuierlich, dauerhaft und ausreichend genau ermittelt werden kann, siehe Fadlallah, 2018.
- Nach Abschluss des Projekts steht eine betriebsbereite Hydraulik für weitere Untersuchungen oder nachfolgende Projekte zur Verfügung.

Das folgende Optimierungspotential konnte ermittelt werden:

- Die Erarbeitung eines angepassten WQM für die Kombination von Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Hybridkollektoren ist notwendig.
- Die Auslegung der Wärmepumpe auf niederexergetische Systeme (Temperaturbereich auf der Primär- und Sekundärseite) und die Anpassung der Steuerung/Regelung der Wärmepumpe sind notwendig.
- Integration des Eisspeichers mit Sensorik für den Beladungszustand in ein intelligentes WQM.
- Der Bewuchs des Eisspeichers ist weitergehend zu bewerten/zu betrachten.
- Untersuchung der Eignung der PVT-Hybridkollektoren für den Betriebsmodus „natürliches Kühlen“ muss noch untersucht werden.
- Detaillierte Untersuchungen der Wechselwirkungen von Strom- und Wärmeseite der PVT-Hybridkollektoren ist noch ausstehend.
- Auswertung der Zeiträume für die direkte Nutzung der Wärme der PVT-Hybridkollektoren in der Wandtemperierung ist ebenfalls noch ausstehend.

1.11 Veranstaltungen

Bei den folgenden Veranstaltungen wurde das Projekt auf regionaler Ebene vorgestellt.

1.11.1 LIESA-Kongress 2017

Bei LIESA handelt es sich um die Landesinitiative Energieinnovation Saar, ein von der Landesregierung des Saarlandes unterstützter technischer und innovationsgetriebener Zusammenschluss von Experten aus Forschung, Energiewirtschaft und Industrie, siehe <https://www.saarland.de/liesa.htm>. Jedes Jahr findet ein Fachkongress der Initiative statt, mit ca. 130 Teilnehmern. Im Jahr 2017 wurde auf diesem Kongress Projekt „LEXU II“ präsentiert.

1.11.2 Fachseminar der Landesinnung Saar „Stuck“ 2018

Auf dem Fachseminar der Landesinnung Saar im Jahr 2018 wurde das Projekt „LEXU II“ unter dem Slogan „Außenwandheizung im WDVS“ präsentiert. Die Präsentation führte zu einer angeregten Diskussion im Auditorium und im Endeffekt zu einigen Vorschlägen für weitere Entwicklungen bzgl. der Idee der aWT.

1.11.3 Saarland voller Energie 2018

Im Rahmen der Aktionswoche „Das Saarland voller Energie“ fand in 2018 ein „Tag der offenen Technikzentrale“ des Projekts LEXU II statt. Die Technikzentrale bzw. die komplette Anlage wurde an diesem Tag der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und Führungen angeboten.

1.11.4 Saaris 2019

Saaris – saarland.innovationen&standort e.V. ist ein Verein der saarländischen Wirtschaft, Gewerkschaften und der Landesregierung. Innerhalb des Vereins werden verschiedene Arbeitskreise angeboten, vornehmlich zur Vernetzung beteiligter Akteure. Im Rahmen des Arbeitskreises „Rationelle Energienutzung“ wurde das Projekt LEXU II erfolgreich einer Gruppe von ca. 15 Interessenten vorgestellt. Im Anschluss an die Präsentation fand eine Führung über die Anlage statt.

1.11.5 Saarland voller Energie 2019

Im Rahmen der Aktionswoche „Das Saarland voller Energie“ fand in 2019 wieder ein „Tag der offenen Technikzentrale“ des Projekts LEXU II statt. Die Technikzentrale bzw. die komplette Anlage wurde an diesem Tag der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und Führungen angeboten. Ein Video zu der Aktionswoche mit Darstellung des Projektes kann unter dem folgenden Link gefunden werden: <https://vimeo.com/363254972/ce796e8f1c>



Abbildung 95: Foto von „Tag der offenen Technikzentrale“ im Rahmen der Aktionswoche „Das Saarland voller Energie“ 2019. Von links nach rechts: Dr.-Ing. Christoph Schmidt (IZES), Dr. Gerhard Luther (UdS), Dr. Bodo Groß (IZES), Ralph Schmidt (Arge Solar). Quelle: Arge Solar

2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil des Gesamtprojektbudgets wurde für die Deckung der Personalkosten benötigt (~55%). Die Kosten für die Projektpartner und die Aufwendungen für die Umsetzung des Demonstrators fallen in etwa gleich aus (20-23%). Eine untergeordnete Rolle spielen die Reisekosten. Reisekosten sind im Allgemeinen vor allen für die Projekttreffen angefallen.

IZES: Neben den Personalkosten sind vor allem Materialkosten für die Umsetzung des Demonstrators und sonstige Vorhabenbezogene Kosten entstanden. Diese ergeben sich aus dem Aufbau der Gesamtanlage bestehend aus Feldtestfassade für aWT/aLT, Wärmepumpe, PVT-Hybridkollektoren auf dem Dach des Gebäudes und der Installation der MSR-Technik.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Alle Arbeiten waren notwendig und in ihrem Umfang angemessen.

4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Verwertungsplan)

IZES: Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt vor allem durch die Erkenntnisse und Erfahrungen, die während des Aufbaus und des Betriebs der Testanlage gesammelt wurden. Dies betrifft auch die durchgeführte Modellbildung der beiden Komponenten aWT und aLT. Dazu zählt der Abgleich der Modelle mit den, während und vor allem nach der Projektlaufzeit erfassten Realdaten (Validierung der Simulationsmodelle). Das installierte Monitoringsystem ist genau wie die Gesamtanlage weiterhin in Betrieb und liefert Messdaten, die zum Teil auch für weitere Forschungsvorhaben verwendet werden können.

Weiterhin wird die Testanlage als Technologiedemonstrator genutzt. Dabei werden sowohl die Projektpartner als auch der Fördermittelgeber durch die zentrale Lage der Testanlage auf dem Campus der Universität des Saarlandes, sowie die angebrachten Infotafel öffentlichkeitswirksam dargestellt.

Auch im wissenschaftlichen Bereich konnte durch den Betrieb der Anlage, bzw. der Durchführung des Forschungsvorhabens und zahlreicher Veröffentlichung der Ergebnisse das Ansehen und der Bekanntheitsgrad des IZES sowie auch der anderen Projektpartner gesteigert werden. Einen wesentlichen Beitrag zur Verbreitung der Projektergebnisse haben auch die während des Vorhabens durchgeführten Veröffentlichungen und Workshops, mit Teilnehmern aus Politik, Wirtschaft und kommunalen Einrichtungen, geleistet. Hierbei konnten der jeweils aktuelle Stand des Vorhabens sowie aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Projekt präsentiert werden.

Schutzrechte wurden im Rahmen des Vorhabens keine angemeldet. Die gemachten Erfahrungen, vor allem bezüglich der Errichtung und des Betriebs der Anlage können jedoch dazu verwendet werden, den Aufbau weiterer Anlagen nach dem Vorbild von LEXU II zu unterstützen. Die Erfahrungen, die durch den Weiterbetrieb der Anlage auch nach Projektende entstehen, können ebenfalls zur verbesserten/optimierten Planung neu zu errichtender Anlagen genutzt werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Innerhalb des Vorhabens wurden mehrere Bereiche definiert, in denen noch akuter Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Bezogen auf den zentralen Projekthalt, die außenliegende Wand- und Lufttemperierung können die folgenden Bereiche genannt werden:

- aWT:
 - Erhöhung des Vorfertigungsgrades bzw. Erarbeitung vorgefertigter Komponenten
 - Ziel: Geringere Systemkosten & bessere Wirtschaftlichkeit
 - Weg: Erarbeitung eines Bauteilkatalogs mit erhöhtem Vorfertigungsgrad
 - Verringerung der Schnittstellen bei der Anbringung:
 - Ziel: Verringerung der Fehlerquellen
 - Weg: Abstimmung der Gewerke bzw. Übernahme mehrerer Arbeiten durch ein Gewerk
 - Optimierung Schichtaufbau
 - Ziel: Geringere Systemkosten & bessere Wirtschaftlichkeit
 - Weg: Vermeidung „unnötiger“ Komponenten im Querschnitt und Einsatz vorgefertigter Bauteile
 - Entwicklung von Produkten/Komponenten für die aWT
 - Ziel: Weg in die Baupraxis – aWT als Komponente für Bestandssanierungen
 - Weg: Optimierung der Anbringung und Entwicklung geeigneter Produkte/Bauteile
 - Versorgung eines gesamten Gebäudes mit aWT
 - Ziel: Monitoring der aWT als primäres Heizsystem für ein gesamtes Gebäude
 - Weg: Umsetzung der aWT im Rahmen einer gesamten Gebäudesanierung
 - Entwicklung geeigneter Regelstrategien
 - Ziel: Anpassung der Regelstrategien an die Trägheit der aWT (und die schnellste Regelbarkeit der aLT)
 - Weg: Definition der Optimierungsziele für die Regelung und Entwicklung entsprechender Strategien
 - Test der aWT als Kühloption
 - Ziel: Einsatz der aWT auch zum Kühlen von Räumen/Gebäuden
 - Weg: Testläufe und Validierung der Simulationsmodelle
 - Potentialermittlung der aWT als Weg zur thermischen Nutzbarmachung der Gebäude(bestands)struktur
 - Ziel: Nutzung des Gebäudebestands als thermischen Speicher für Kälte/Wärme
 - Weg: Simulationsstudien mit den validierten Simulationsmodellen unter Verknüpfung mit entsprechend angepassten Regelstrategien
 - Potentialermittlung der aWT als Möglichkeit der Spitzenlastverschiebung
 - Ziel: Vermeidung von Spitzenlasten
 - Weg: Durch die Trägheit der aWT können Wärmebedarf und Wärmebereitstellung voneinander entkoppelt werden
- aLT (zusätzlich zu den Punkten der aWT):
 - Überführung der energetischen Ergebnisse der aLT in Richtung einer Standardumsetzung
 - Ziel: Überführung des Prototypen aus der Umsetzung an der Feldtestfassade in industrielles Produkt
 - Weg: Optimierung des Schichtaufbaus, Erhöhung des Vorfertigungsgrades und Diskussion der relevanten Punkte:
 - Welche Aktorik wird benötigt und wie ist diese zugänglich zu installieren?
 - Welche Sensorik wird benötigt und wie ist diese zugänglich zu installieren?

- Welche Anforderungen gelten bzgl. Reinigung und Hygiene des Luftspalts der aLT?
- Versorgungssystem für beide Komponenten:
 - Integration der beiden Komponenten in ganzheitlich niederexergetische Versorgungssysteme
 - Ziel: Ausnutzen der niederexergetischen Potentiale der beiden Komponenten durch ganzheitlich niederexergetische Planung und Umsetzung des Versorgungssystems
 - Weg: Entwicklung einer geeigneten Hydraulik und Entwicklung geeigneter Wärmepumpen mit entsprechenden Anforderungen an die primär- und sekundärseitige Temperaturbandbreite
 - Entwicklung passender Regelstrategien für die Kombination von aWT/aLT und Wärmerzeugern
 - Ziel: Ausnutzung der Potentiale der aWT (s.oben)
 - Weg: Erarbeitung entsprechender Regelstrategien auf Modellebene mit der Möglichkeit der Umsetzung an der Feldtestfassade
- Sonstiges:
 - Entwicklung eines Wärmequellenmanagements für eine Wärmepumpe mit verschiedenen Wärmequellen
 - Ziel: Ausnutzung der energetisch „besten“ Wärmequelle für die Wärmepumpe (insbesondere bei der Kombination mit aWT)
 - Weg: Erarbeitung des Wärmequellenmanagements auf Modellebene, durch die Berechnung/Ermittlung von Potentialen für alle Quellen und Umsetzung/Verifizierung an der Feldtestfassade.
 - Potentialermittlung der PVT-Kollektoren im Modus „natürliches kühlen“
 - Ziel: Ermittlung des Rückkühl-Potentials der PVT-Kollektoren
 - Weg: Messungen, Berechnungen und Simulation

5 Fortschritte anderer Stellen während der Projektlaufzeit

Die Fortschritte anderer Stellen zu den relevanten Themen (Bezug Wandtemperierung mit Fokus auf der Idee der aWT und aLT) kann dem Kapitel 2 in Schmidt (2019), siehe Anhang entnommen werden.

6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Für das Projekt wurde die Homepage www.projekt-lexu.de erstellt.

6.1 Artikel und Vorträge:

1. Kongress Intelligente Gebäudetechnik, Handwerkskammer Trier, Vortrag „Die Außenwand und ihre Möglichkeiten“, *Michael Mahler*, Datum: 28.09.2012,
2. FVEE-Jahrestagung 2014, Energiewende im Heizungskeller, Folie 19 & 20, *Danjana Theis*
3. FVEE-Jahrestagung 2015, Effiziente Wärmesystem in Wohngebäuden, Folie 20 & 21, *Christoph Schmidt*
4. 7. SENSAL-Treffen, Luzern (SUI), „LEXU II: Einsatz von außenliegender Wandtemperierung...“, *Christoph Schmidt*, Datum: 31.08.2016
5. 27. Symposium Thermische Solarenergie, „In situ Messungen zur dynamischen Leistungscharakterisierung und Modellierung von PVT-Kollektoren“, *Christoph Schmidt*, Datum: 10.-12.05.2017
6. Bauphysiktage Kaiserslautern 2017, „Außenliegende Wand- und Lufttemperierung“, *Christoph Schmidt*, Datum: 25.-26.10.2017
7. Artikel in BDB-Landesnachrichten 4/2017, „Umsetzung einer außenliegenden Wand- und Lufttemperierung mit niederexergetischem Versorgungssystem“, Seite 29ff., *Christoph Schmidt, Horst Altgeld, Bodo Groß*
8. Bauphysik 39(2017), Heft4, Seite 215-223, „Außenliegende Wandtemperierung“, *Christoph Schmidt, Gerhard Luther, Horst Altgeld, Stefan Maas, Bodo Groß, Frank Scholzen*
9. FVEE Jahrestagung 2017, Energie- und ressourceneffiziente Gebäude, Folie 12, *Christoph Schmidt*
10. 11. SENSAL-Treffen, Luzern (SUI), „Außenliegende Wand- und Lufttemperierung“, *Christoph Schmidt*, Datum: 29.11.2017
11. Sanitär+HeizungsTechnik 2/2018, „Keine Energiewende ohne Wärmewende“, Teil 1, *Christoph Schmidt, Bodo Groß*
12. Sanitär+HeizungsTechnik 4/2018, „Keine Energiewende ohne Wärmewende“, Teil 2, *Christoph Schmidt, Bodo Groß*
13. 47. Fachseminar der Landesinnung Saar Stuck, „Gebäudesanierung mit WDVS und außenliegender Wand- und Lufttemperierung“, *Horst Altgeld*, Datum: 26.01.2018
14. Jahrbuch Energieeffizienz in Gebäuden, Ausgabe 2018, „LowEx-Wandtemperierung“, *Christoph Schmidt, Bodo Groß*
15. TRNSYS Experience Day 2018, Belval (Lux), „Low Ex Wall Tempering for Building Refurbishment“, *Christoph Schmidt*, Datum: 20.04.2018
16. Transforming Cities Heft 2 2018 „Niedertemperatur-Wandtemperierung“, *Christoph Schmidt und Bodo Groß*
17. Bauphysik 40(2018), Heft4, Seite 188-202, „Außenliegende Wandtemperierung“, *Christoph Schmidt, Gerhard Luther, Horst Altgeld, Stefan Maas, Bodo Groß, Frank Scholzen*
18. BauSim 2018, Karlsruhe, „Modellierung und Validierung von Simulationsansätzen für die aussenliegende Lufttemperierung“, *Christoph Schmidt*, Datum: 26.-27.09.2018
19. Das Saarland VOLLER ENERGIE, LEXU II – Tag der offenen Technikzentrale, *Datum: 21.09.2018, Christoph Schmidt*
20. Bauphysiktage Weimar, 2019, „Auswertung eines Großdemonstrators mit außenliegender Wandtemperierung, Wärmepumpe, Eisspeicher und PVT-Hybridkollektoren“, *Christoph Schmidt*, Datum: 25.-26.09.2018
21. Bauphysiktage Weimar, 2019, „Inbetriebnahme und Monitoring einer Feldtestfläche zur außenliegenden Lufttemperierung“, *Felix Hähn*, Datum: 25.-26.09.2018
22. Saaris, „Niedertemperatur-Heizung & -Kühlung im Gebäudebestand“, *Christoph Schmidt, Felix Hähn und Horst Altgeld*, Datum: 18.09.2019
23. Das Saarland VOLLER ENERGIE, LEXU II – Tag der offenen Technikzentrale, *Datum: 20.09.2019, Christoph Schmidt*

6.2 Pressemeldungen und Posterpräsentationen:

1. Posterpräsentation und Beitrag Tagungsband OTTI-Symposium Thermische Solarenergie 2013, Kloster Banz, Bad Staffelstein, „Solarthermische Nutzung der Gebäudefassade durch integrierte Absorberelemente“, *Horst Altgeld, Danny Jonas, Michael Mahler, Christoph Schmidt*, Datum: 24.-26.04.2013
2. Posterpräsentation und Beitrag Tagungsband EnOB Symposium, Zeche Zollverein, Essen, „LEXU 2- Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung“, *Horst Altgeld, Danny Jonas, Gerhard Luther, Michael Mahler, Christoph Schmidt*, Datum: 20.-21.03.2014
3. Pressemitteilung der Universität des Saarlandes vom 10.11.2015, „Innovative außenliegende Wandheizung wird an Uni-Gebäude getestet“
4. Pressemeldung der DBZ, Ausgabe 12/2015 „Test: außenliegende Wandheizung an Uni-Gebäude“, Seite 10
5. Pressemeldung auf umwelt-panorama.de vom 10.11.2015, „Neuartiges Heiz- und Kühlsystem für Gebäude“
6. Pressemeldung „TGA-Newsletter“ vom 12.11.2015, „Feldtest mit außenliegender Wandheizung“
7. Pressemeldung in „Der Bausachverständige“ vom 23.11.2015, „Innovative außenliegende Wandheizung wird an Uni-Gebäude getestet“
8. Pressemeldung des BINE Informationsdienst vom 02.12.2015 „Gebäude über Außenwand heizen“
9. Artikel in IKZ – Heizungstechnik 1/2/2016, „Gebäude über Außenwand heizen“
10. Pressemeldung in EnOB-Newsletter Juli 2016, „Gebäudesanierung mit außen liegender Wandheizung“
11. Posterpräsentation, TRNSYS Experience Day 2016, Kaiserslautern, „Field test of an outlying wall tempering for building refurbishment“
12. Posterpräsentation und Beitrag Tagungsband im Rahmen des 24. Energiesymposiums REGWA an der FH Stralsund. *„Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung“*, Datum: 05.11.2016 - 07.11.2016
13. Posterpräsentation mit Beitrag im Tagungsband BauSim 2016, Dresden „LEXU II – Einsatz von aussenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung“, *Christoph Schmidt, Horst Altgeld, Bodo Groß, Gerhard Luther, Daniel Schmidt*, Datum: 14.-16.09.2016
14. Posterpräsentation, TRNSYS Experience Day 2017, Arlon (BEL), „Field test of an outlying wall tempering for building refurbishment – together with heat pump, PCM-storage and PVT-collectors“, Datum: 02.-03.03.2017
15. Stand auf dem LIESA Kongress 2017 mit Posterpräsentation, „Demonstrator mit einer außenliegenden Wandtemperierung“, Datum: 16.05.2017

6.3 Durchgeführte studentische Arbeiten / Abschlussarbeiten:

1. Schmidt, Christoph; 2011, F&E-Arbeit, „Theoretische Betrachtung eines Außenwandabsorbers und Erstellung einer Simulationssoftware in VBA“, htw saar, 2011
2. Schmidt, Christoph; 2011, Master-Thesis, „Simulation eines komplexen Gebäude-Energieversorgungssystems mit TRNSYS“, htw saar, Saarbrücken, 2011
3. Jonas, Danny; 2012, Studienprojekt, „Entwicklung eines Simulationsmodells zur dynamischen Untersuchung einer Außenwandheizung in Kombination mit einem Außenwandabsorber“, Fachhochschule Trier, Trier, 2012
4. Schmidt, Daniel; 2013, Bachelor-Thesis, „Modellierung einer außen liegenden Luftheizung (aLH) mit Hilfe der Software TRNSYS und Vergleich der Simulationsergebnisse mit Modellrechnungen in Excel und Messungen“, htw saar, Saarbrücken, 2013
5. Jonas, Danny; 2013, Master-Thesis, „Modellierung, Simulation und Optimierung eines solargestützten Wärmepumpensystems mit Eisspeicher, Fassadenabsorber und außenliegender Wandheizung“, Fachhochschule Trier, Trier, 2013
6. Schmidt, Daniel; 2015, F&E-Arbeit, „Modellierung der außenliegenden Luftheizung (aLH) in TRNSYS & Simulationsstudien anhand eines Referenzgebäudes“, htw saar, Saarbrücken, 2015
7. Seufert, Dominik; 2016, Bachelor-Thesis, „Gebäudesanierung mit außenseitig aufgetragenen Wandheizungen“, Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, 2016
8. Schmidt, Marcel; 2016, Bachelor-Thesis, „Planung, Katalogisierung sowie Dokumentation der Messsensorik einer außenliegenden Wand bzw. Luftheizung im Rahmen des Forschungsprojektes LEXU II“, Hochschule Nordhausen, Nordhausen, 2016
9. Schmidt, Daniel; 2016, Master-Thesis, „Messtechnische Charakterisierung und Simulation von PVT-Kollektoren“, htw saar, Saarbrücken, 2016
10. Eckert, Manuel & Palm, Sebastian; 2017, Bachelor-Thesis, „Durchführung von in situ Messungen zur dynamischen Leistungscharakterisierung und Modellierung einer PVT-Kollektoranlage im Rahmen eines Demonstrationsobjektes“, htw saar, Saarbrücken, 2017
11. Becker, Kevin; 2017, F&E-Arbeit, „Einfluss von Zonierung und Nutzung auf die Energiekennwerte des Referenzgebäudes aus der IEA SHC Task 32 und 44; Simulationsstudien mit TRNSYS“, htw saar, Saarbrücken, 2017
12. Fadallah, Mehdi; 2018, Bachelor-Thesis, „Untersuchungen zur Ermittlung des Vereisungsgrades eines Eisspeichers für die Regelung des Beladungs- und Entladungszustands“, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin, 2018
13. Murke, Rino; 2019, Bachelor-Thesis, „Erarbeitung eines Wärmequellenmanagements für die Kombination einer Wärmepumpe mit PVT-Hybridkollektoren und Eisspeicher“, Ostbayerische Technische Hochschule, Amberg-Weiden, 2019
14. Hähn, Felix; 2019, Master-Thesis, „Inbetriebnahme und Monitoring einer Feldtestfläche der außenliegenden Lufttemperierung mit abschließender Validierung des Simulationsmodells in TRNSYS“, Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Birkenfeld, 2019
15. Schmidt, Christoph; 2019, Dissertation, „Feldtest und dynamische Simulation der außenliegenden Wandtemperierung“, Université du Luxembourg, Luxembourg, 2019, verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10993/41889>

7 Quellen

- Altgeld & Luther (2002): Luther, G., Altgeld, H. 2002: Die außenliegende Wandheizung, In: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 2002 (1), S. 8-15
- Altgeld et al. (2010): Altgeld, H., Boettcher, J., Dürnhöfer, A., Mahler, M. 2010: Endbericht des Projektes LEXU (Fkz. 0327370T) „Energieeinspar- und Kostensenkungspotentiale durch den Einsatz von außen liegenden Wandheizungssystemen (aWH) für Niedertemperaturanwendungen, IZES gGmbH, Saarbrücken, 2010
- BINE (2015): Gebäude über Außenwand heizen, BINE Informationsdienst, 02.12.2015
- Clina (2013): Planungshandbuch der Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH, Stand 2013, Berlin
- DIN EN 1264-1 (2011): DIN EN 1264-1 : 2011-09 „Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung- Teil 1: Definition und Symbole“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1264-2 (2013): DIN EN 1264-2 : 2013-03 „Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung- Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1264-3 (2009): DIN EN 1264-3 : 2009-11 „Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung- Teil 3: Auslegung; deutsche Fassung EN 1264-2:2009“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1264-5 (2009): DIN EN 1264-5 : 2009-01 „Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung- Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden – Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung; deutsche Fassung EN 1264-5:2008“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN ISO 6946 (2018): DIN EN ISO 6946 : 2018-03 „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Dott et al. (2013): Dott, R., Haller, M., Ruschenburg, J., Ochs, F., Bony, J. 2013: The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part B: Buildings and Space Heat Load, A technical report of subtask C, Institut Energie am Bau – Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz, Schweiz, 2013
- Eggert & Palm (2016): siehe Kapitel 6.3 (10)
- Fadlallah (2018): siehe Kapitel 6.3 (12)
- Fanger (1970): Fanger, P. O. 1970: Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press, Kopenhagen, 1970
- Glück (1982): Glück, B. 1982: Strahlungsheizung – Theorie und Praxis, Karlsruhe Müller, 1982, ISBN: 3788071575
- Glück (1999): Glück, B. 1999: Thermische Bauteilaktivierung: Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren, Heidelberg Müller, 1999, ISBN: 3788076747
- Glück (2008): Glück, B. 2008: Fachlicher Teil gemeinsamen Abschlussberichts des F/E-Themas: Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung, Westsächsische Hochschule Zwickau, 2008
- Haller et al. (2013): Haller, M., Dott, R., Ruschenburg, J., Ochs, F., Bony, J. 2013: The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part A: General Simulation Boundary Conditions, A technical report of subtask C, Institut für Solartechnik SPF, Rapperswil, Schweiz, 2013
- Hau (2010): Hau, P. 2010: Nutzung der „außen liegenden Wandheizung“ zur Temperierung der „Frischlufte“ bei der Gebäudesanierung, Master-Thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Saarbrücken, 2010
- Hähn (2019): siehe Kapitel 6.3 (14)
- Kalz (2009): Kalz, D. 2009: Heating and Cooling Concepts Employing Environmental Energy And Thermo-Active Building System for Low-Energy Buildings – System Analysis and Optimization, Dissertation der Universität Karlsruhe (TH), Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2010

- Koschenz & Lehmann (2000): Koschenz, M., Lehmann, B., 2000: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, Dübendorf EMPA, 2000, ISBN: 3905594196
- Luther (2008): Luther, G. 2008: Das thermische Verhalten der Außenwandheizung (aWH), Theoretische Grundlagen, Abschlussbericht zu Arbeitspaket 2a des Forschungsprojektes LEXU (Fkz. 0327370T) der IZES gGmbH, Saarbrücken
- Luther (2013): Luther, G. 2013: Außenliegende Luftheizung, Konzept, Modellierung und Analysen. Fachbericht für das Projekt LEXU II (Fkz. 0327370Y), Universität des Saarlandes, FSt. Zukunftsenergie, Saarbrücken; 2013 <http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>
- Murke (2019): siehe Kapitel 6.3 (13)
- Olesen et al. (2005): Olesen, B. W., Dossi, F.C. 2005: Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für Betonkernaktivierung, Teil 1, HLH, 56(1), S. 29-34, VDI Fachmedien, Düsseldorf, 2005
- Pfafferott (2015): Pfafferott, J., Kalz, D., Koenigsdorff, R. 2015: Bauteilaktivierung: Einsatz – Praxiserfahrung – Anforderungen, Stuttgart Fraunhofer IRB Verlag, 2015, ISBN: 978816793571
- Pistohl et al. (2013): Pistohl, W., Rechenhauer, C., Scheuerer, B. 2013: Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2, 8. Auflage, Werner Verlag Köln, 2013, ISBN: 978-3-8041-4687-7
- Schmidt et al. (2017): Schmidt, C., Luther, G., Altgeld, H., Maas, S., Groß, B., Scholzen, F. 2017: „Außenliegende Wandtemperierung“ – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandswand: theoretische Grundlagen und Kennwerte, in: Bauphysik (39) 2017, Heft 4, S.215 – 223, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2017 <https://doi.org/10.1002/bapi.201710028>
- Schmidt et al. (2018): Schmidt, C., Luther, G., Altgeld, H., Maas, S., Groß, B., Scholzen, F. 2018: „Außenliegende Wandtemperierung“ – Praktische Umsetzung anhand eines Demonstrationsgebäudes und Ermittlung der Systemkosten, in: Bauphysik (40) 2018, Heft 4, S.187 – 202, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2018 <https://doi.org/10.1002/bapi.201810021>
- Schmidt (2019): siehe Kapitel 6.3 (15)
- Schneider & Berthold (2016): Schneider, W., Berthold, H. 2016: Praktische Regelungstechnik, 4. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2016, ISBN: 978-3-658-16992-3
- Thornton (2007): Thornton, J. 2007: Ventilated, Air Cavity Wall, Documentation for Type 1230, TESS LLC, 2007
- VDI (2013): VDI 2013: VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013

8 Anhang

- [1] Dissertation C. Schmidt, 2019: „Feldtest und dynamische Simulation der außenliegenden Wandtemperierung“, Universität du Luxembourg
- [2] Master-Thesis F. Hähn, 2019: „Inbetriebnahme und Monitoring einer Feldtestfläche der außenliegenden Lufttemperierung“, Hochschule Trier
- [3] Bachelor-Thesis R. Murke, 2019: „Erarbeitung eines Wärmequellenmanagements für die Kombination einer Wärmepumpe mit PVT-Hybridkollektoren und Eisspeicher“, OTH Amberg-Weiden
- [4] Abschlussbericht AP2 „CO₂-WP“ – Untersuchungen an einem Prototyp, Experimentelle Ergebnisse & Simulation mit Berechnungen, IZES gGmbH, 2014
- [5] Abschlussbericht AP2 „CO₂-WP“ – CO₂ Wärmepumpe für thermodynamisch optimiertes Heizen, Gerhard Luther, 2015
- [6] Abschlussbericht AP3 „aLT“ – Teil 1) Experimentelle Ergebnisse und Schlussfolgerungen, IZES gGmbH, 2013
- [7] Abschlussbericht AP3 „aLT“ – Teil 2) Zusammenfassung der theoretischen Arbeiten – Konzept, Modellierung und Analysen, Gerhard Luther, 2013
- [8] Bautagebuch „Umsetzung Demonstrator“, IZES gGmbH, 2020