

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-007/2017

Bauphysikalische Begleitforschung zur Bauteiltemperierung im Kloster Aldersbach

Durchgeführt im Auftrag

Förderkreis Kloster Aldersbach

Klosterplatz 1

94501 Aldersbach

Der Bericht umfasst

89 Seiten Text

4 Tabellen

107 Bilder

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

M. Eng. Stefan Bichlmair

Prof. Dr. Ralf Kilian

Prof. Dr. Martin Krus

Valley, 22. Mai 2017

Abteilungsleiter



Prof. Dr. Hartwig Künzel

Gruppenleiter



Prof.- Dr. Martin Krus

Bearbeiter



M. Eng. Stefan Bichlmair

Inhalt

1	Hintergrund und Zielsetzung	3
2	Innovative und energiesparenden Temperierung	3
2.1	Entwicklung der Einbauabmessungen mit Hilfe von zweidimensionalen Berechnungen	4
2.2	Ergebnis und Beurteilung der rechnerischen Untersuchung	6
2.3	Einbau der Temperierung und Leitungslänge	22
2.3.1	Dokumentation Einbau der Temperierung mit Dämmung	24
2.3.2	Grundvariante ohne zusätzliche Dämmung	28
3	Messtechnische Untersuchungen	30
3.1	Messkonzept	30
3.2	Messdaten Dauermessung	34
3.2.1	Außenklima und Raumklima im Flur	34
3.2.2	Übersicht Raumklima in den Zimmern 2.26 bis 2.31	35
3.2.3	Vergleich der Raumklimata in den Räumen untereinander	42
3.2.4	Messung Temperatur Wandoberfläche bei Laibungsschleife	47
3.2.5	Vergleich Wandoberflächentemperatur und Wandtemperatur hinter der Sockelschleife	52
3.2.6	Messung Wärmeabgabe	53
3.3	IR-Messung	62
3.3.1	Raum 2.26 <u>mit</u> Dämmung hinter der Temperierung	64
3.3.2	Raum 2.27 <u>mit</u> Dämmung hinter der Temperierung	65
3.3.3	Raum 2.28 <u>mit</u> Dämmung hinter der Temperierung	69
3.3.4	Raum 2.29 <u>ohne</u> Dämmung hinter der Temperierung	71
3.3.5	Raum 2.30 <u>ohne</u> Dämmung hinter der Temperierung	74
3.3.6	Raum 2.31 <u>ohne</u> Dämmung hinter der Temperierung	76
3.3.7	Wasserschaden an der Decke Raum 2.30 und 2.31	77
3.3.8	IR-Aufnahmen Außen	81
4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	85
5	Literaturverzeichnis	90
A.1	Dokumentation Datenlogger	92

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die bestehende denkmalgeschützte Gaststätte des ehem. Klosters Aldersbach soll saniert werden. Die Sanierung der Heiztechnik wird durch die DBU gefördert. Hierfür ist eine unabhängige Begleitforschung erforderlich.

Die Außenwände sind im erdberührtem Bereich durchfeuchtet. Zur Verbesserung der Bauteilsituation und des Raumklimas zum Erhalt des wertvollen Kulturgutes und zur Minderung der aus der Heiztechnik resultierenden anthropologischen Schäden soll eine Bauteiltemperierung eingebaut werden. Insbesondere sollen die feuchtebeladenen Wände getrocknet und vor weiteren Taupunkttemperaturunterschreitungen geschützt werden. Ebenso ist für die geplante Nutzung in einigen Räumen eine mehr konservatorische Beheizung erforderlich. In anderen Räumen ist zur Nutzung als Herbergsbetrieb zur Grundtemperierung eine schnelle Aufheizung von einzelnen Räumen auf eine für Menschen thermische Behaglichkeit erforderlich. Zur Einschätzung der geplanten Maßnahmen sollen rechnerische Untersuchungen durchgeführt werden.

Für die unterschiedlichen Anwendungszwecke sollen zwei unterschiedlich verlegte Bauteiltemperierungen untersucht werden. Dabei wird eine Einbauvariante entsprechend der üblichen Montagepraxis nach Großschmidt direkt im Mauerwerk eingeputzt verlegt. Der Einbau der zweiten Variante ist zur Optimierung der Aufheizleistung, Bereitstellung von mehr Heizleistung für das Erreichen von Temperaturen für die thermische Behaglichkeit sowie zur Energieeinsparung hin optimiert vorgesehen. Hierfür wird eine innovativ gedämmte Variante des klassischen Einbaus zum Einsatz gebracht und vergleichend untersucht.

2 Innovative und energiesparenden Temperierung

In denkmalgeschützten Gebäuden werden bei der Sanierung von Feuchtschäden an Bauteilen zur Verbesserung der Raumlufthygiene durch Vermeidung von Taupunkttemperaturunterschreitungen und zum konservatorischen Beheizen im Sinne der Präventiven Konservierung als Heizsystem Bauteiltemperierungen eingesetzt. Die Bauteiltemperierung kann hierfür als eine geeignete Methode angesehen werden. Für die Beurteilung und Berechnung der Bauteiltemperierung bestehen umfangreiche Erfahrungen [1-17].

Zur Optimierung des bekannten Einbaus der Temperierung unter Putz erfolgt eine Untersuchung mit Hilfe der Simulationssoftware WUFI® 2D. Mit dieser Software ist es möglich, die Auswirkungen der Heizleitung unter Putz auf das Mauerwerk zu untersuchen. Für die optimale energiesparende Auslegung werden dazu Dämmschichten in Verbindung mit der Heizleitung untersucht. Mit der rechnerischen Voruntersuchung wird damit eine optimierte Anordnung ermittelt, die eine optimale Wärmeabgabe in den Raum ermöglicht und zugleich die Wärmeabgabe nach außen reduziert. In Verbindung mit Hochleistungsdämmstoffen ist eine innovative und energiesparende Ausführung der Temperierung möglich.

2.1 Entwicklung der Einbauabmessungen mit Hilfe von zweidimensionalen Berechnungen

Für eine erste Einschätzung der Wirkungsweise der zwei unterschiedlichen Varianten (gedämmte und nicht gedämmte Temperierung) wird eine vergleichende rechnerische Untersuchung durchgeführt. Die Berechnung erfolgt mit der Software WUFI®-2D. Untersucht werden die Temperaturverteilungen und Wärmeströme im hygrothermisch berechneten zweidimensionalen aufgebauten Rechenmodell. Die Berechnungen berücksichtigen die mit feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Randbedingungen und in Tabelle 2 die Bauteilabmessungen sowie Einbaumaße der untersuchten Varianten angegeben. In Bild 1 ist das Simulationsmodell der Außenwand im Regelquerschnitt im vertikalen Schnitt mit Temperierung und zusätzlicher Dämmung abgebildet. Die genaue Einbausituation der Temperierung und Dämmung ist im Detailausschnitt bemaßt und vergrößert dargestellt. Die in der Simulation implementierte Wandhöhe beträgt 2 m und die Wanddicke 0,63 m. Die Temperierung wird als 15 mm x 15 mm großes Quadrat abgebildet. Das Finite-Elemente Gitter enthält $230 \times 294 = 67.620$ Elemente. Die Berechnungen werden im 2-Stunden-Intervall mit 26280 Zeitschritten (entspricht 6 Jahren) durchgeführt. Die verwendete Bauteilgeometrie und Gitterstruktur liefert für diese vergleichende Betrachtung ausreichend genaue Ergebnisse (vgl. [17]).

Als Referenz wurde die effizienteste Einbauanordnung der Bauteiltemperierung ohne Dämmung verwendet, die baupraktisch sinnvoll möglich ist. Als effizient wird hier der geringste Wärmestrom nach außen bei maximalem Wärmestrom nach innen bezeichnet.

Tabelle 1:
Angesetzte Randbedingungen und Kennwerte der zweidimensionalen Bauteilsimulation.

Randbedingung	Wert	Einheit
T Raum	20	°C
T Außen	-5	°C
Temperatur Heizleitung	60	°C
Wärmeübergangskoeffizient Heizleitung	1000	W/m ² K
Wärmeübergangskoeffizient innen	8	W/m ² K
Wärmeübergangskoeffizient außen	17	W/m ² K
Wärmeleitfähigkeit Ziegelmauerwerk	0,6	W/mK
Wärmeleitfähigkeit Innen- und Außenputz	0,7	W/mK

Tabelle 2:
 Untersuchte Varianten zur Optimierung der Wärmeabgabe nach innen und der Wärmeverluste nach außen.

Variante Bezeichnung: $\lambda - b - p - s$	Dämmstoff λ -Wert (bei 10°C) [W/m ² K]	Dicke d und Breite b der Dämmung [mm]	Putzüber-de- ckung p [mm]	Abstand zw. Heizl. und Dämmung s [mm]
Referenz	ohne	-	5	-
009 - 45 - 5 - 10	0,009	20 x 45	5	10
009 - 45 - 10 - 10	0,009	20 x 45	10	10
009 - 45 - 15 - 10	0,009	20 x 45	15	10
009 - 45 - 5 - 0	0,009	20 x 45	5	0
009 - 45 - 15 - 0	0,009	20 x 45	15	0
009 - 45 - 15 - 15	0,009	20 x 45	15	15
009 - 45 - 15 - 20	0,009	20 x 45	15	20
009 - 100 - 5 - 0	0,009	20 x 100	5	0
009 - 100 - 15 - 0	0,009	20 x 100	15	0
009 - 100 - 15 - 10	0,009	20 x 100	15	10
009 - 100 - 15 - 15	0,009	20 x 100	15	15
040 - 45 - 10 - 10	0,040	20 x 45	10	10
028 - 45 - 10 - 10	0,028	20 x 45	10	10
018 - 45 - 10 - 10	0,018	20 x 45	10	10

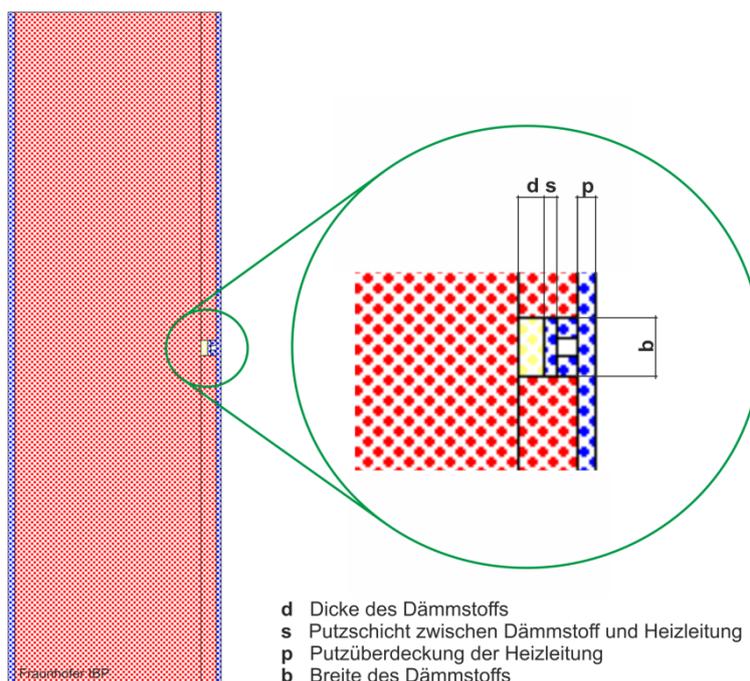
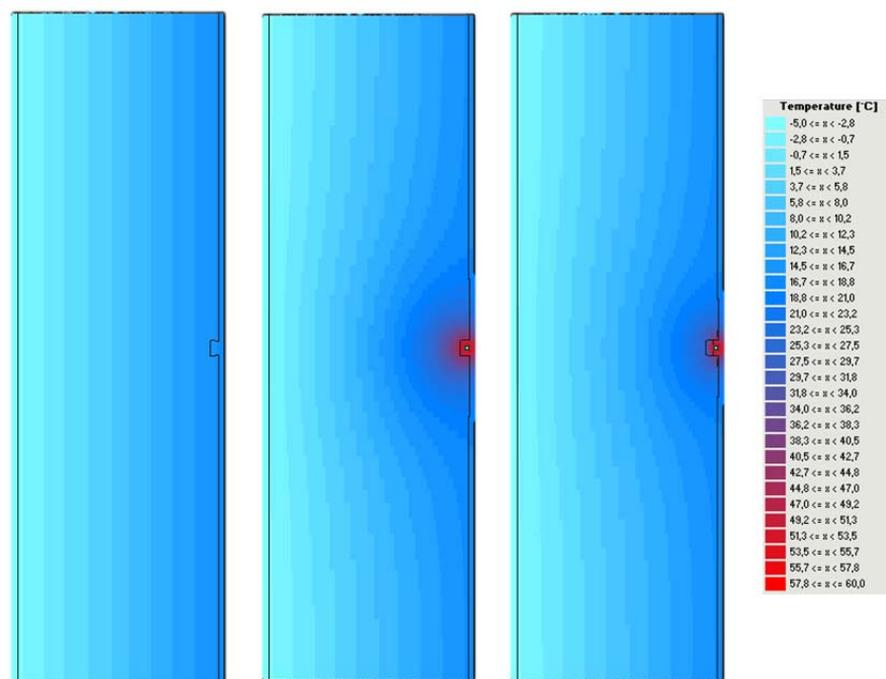


Bild 1:
 WUFI® 2D Simulationsmodell der Außenwand im Regelquerschnitt im vertikalen Schnitt mit Temperierung und zusätzlicher Dämmung. Die genaue Einbausituation der Temperierung und Dämmung ist im Detailausschnitt bezeichnet und vergrößert dargestellt.

2.2 Ergebnis und Beurteilung der rechnerischen Untersuchung

Die Auswertung der rechnerischen Untersuchung erfolgt anhand der Bilanzierung der Wärmeströme auf der Wandinnenseite und der Wandaußenseite. Durch einfache Bilanzierung wird damit die Gesamtwärmeabgabe der Temperierung sowie die Wärmeabgabe der Temperierung nach außen und nach innen ermittelt [17]. Mit den unterschiedlichen Anordnungen der Temperierung und Dämmvarianten stellen sich an der Innen- und Außenoberfläche unterschiedliche Wärmeströme ein. Die Wärmeströme der untersuchten Varianten mit Dämmung werden den Wärmeströmen der Referenz (Temperierung ohne Dämmung) gegenübergestellt.



- ohne Temperierung
- mit Temperierung
- ohne Dämmung
- mit Temperierung
- mit Dämmung

Bild 2:

Berechnete thermische Felder der Außenwand im vertikalen Schnitt (Wandhöhe 2 m). Im linken Bild ist das thermische Feld ohne Temperierung abgebildet, in der Mitte mit Temperierung und im rechten Bild mit Temperierung und zusätzlicher Dämmung im Bereich der Temperierung.

Bild 3 zeigt die Detaildarstellung der berechneten thermischen Felder aus Bild 2 in unmittelbarem Umfeld der Temperierung. Im linken Bild ist die Wirkung der Bauteiltemperierung auf die Temperaturverteilung abgebildet. Im rechten Bild wurde direkt an der Temperierung ein Dämmstreifen angeordnet. Die schwarzen Linien geben die Bauteilgrenzen an (Putz, Mauerwerk, Dämmung). Die Heizleitung ist als weißes Quadrat abgebildet. Die thermischen Felder unterscheiden sich deutlich voneinander.

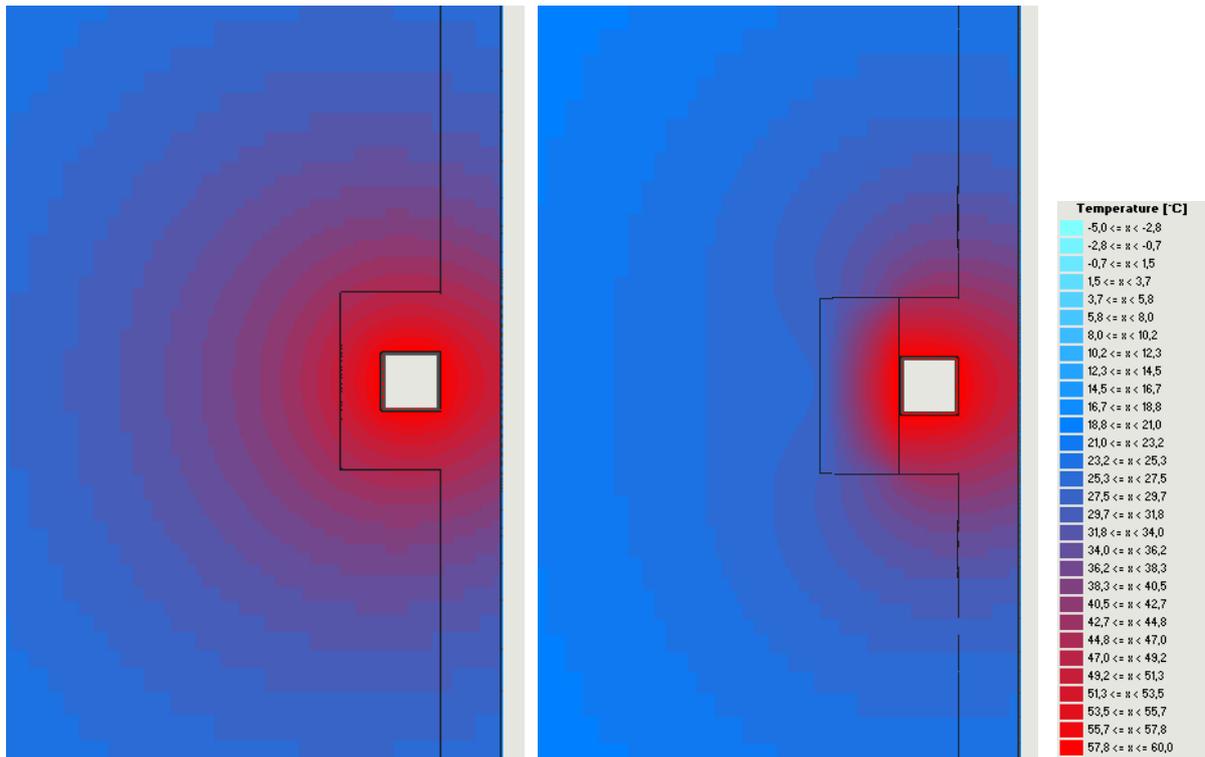


Bild 3:
 Detaildarstellung der berechneten thermischen Felder im vertikalen Wandschnitt im unmittelbaren Bereich der Temperierung ohne Dämmung (linkes Bild) und mit Dämmstreifen (rechtes Bild).

Für alle Varianten mit Dämmstoff ergibt sich ein geringerer Gesamtwärmestrom der Temperierung, siehe Tabelle 3. Es verringert sich der Wärmestrom nach außen Q_a aber auch nach innen Q_i . Für eine Vergleichbarkeit der Energieeinsparung durch eine Dämmung muss bei allen Varianten der gleiche Wärmestromanteil nach innen abgegeben werden. Dies wird z.B. durch eine Verlängerung der Heizleitung erreicht, d.h. für die gleiche Wärmewirkung zum Raum wie die Referenz wird die Heizleitungslänge der jeweiligen Variante erhöht, bis der Wärmestrom Q_i der Variante dem Wärmestrom $Q_{i, \text{Referenz}}$ der Referenz entspricht. Alternativ kann auch die Vorlauftemperatur entsprechend erhöht werden, bis der gleiche Wärmestrom nach innen abgegeben wird. Das Wärmestromverhältnis $Q_{i, \text{Referenz}} / Q_i$ ergibt den Faktor f_{Q_i} , um den die Heizleitung für die gleiche Wärmeabgabe nach innen wie die Referenz verlängert werden muss.

Der Kehrwert $Q_i / Q_{i, \text{Referenz}}$ ergibt den Reduktions-Faktor $f_{Q_i, \text{red}}$, um den die gedämmte Variante der Temperierung weniger Wärme nach innen abgibt. Durch eine größere Leitungslänge erhöhen sich jedoch auch die Wärmeströme nach außen Q_a um den Faktor f_{Q_i} . Für die Bewertung der gedämmten Varianten wird der um den Faktor f_{Q_i} erhöhte Wärmestrom nach außen $Q_{a, f}$ mit dem Wärmestrom der Referenz nach außen $Q_{a, \text{Referenz}}$ verglichen. Das Verhältnis der Differenz der Wärmeströme nach außen zum Wärmestrom der Referenz $(Q_{a, f} - Q_{a, \text{Referenz}}) / Q_{a, \text{Referenz}}$ wird in Prozent angegeben.

Der Wärmestrom der Referenz $Q_{a, \text{Referenz}}$ entspricht dabei 100 %. Ist die ermittelte Effizienz kleiner 100 % wird weniger Wärme durch die Temperierung nach außen abgegeben, bei gleicher Wärmeabgabe nach innen. Die Variante ist damit effizienter, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3:

Wärmeströme (WS) nach innen und außen sowie daraus berechnete Wärmestromverhältnisse zur Beurteilung der Effizienz der jeweiligen Variante im Vergleich zur Referenz.

Kurzbezeichnung $\lambda - b - p - s$	WS gesamt Q_{ges}	WS innen Q_i	WS außen Q_a	Erhöhungsfaktor f_{Q_i}	Erhöhter WS außen $Q_{a,f} = Q_a * f_{Q_i}$	Verlustminderung $(Q_{a, \text{Ref}} - Q_{a,f}) / Q_{a, \text{Referenz}}$
	[W]	[W]	[W]	[-]	[W]	[%]
Referenz	51,39	45,25	-6,14	1,00	-6,14	0,0
009 - 45 - 5 - 10	44,34	39,96	-4,38	1,13	-4,95	19,4
009 - 45 - 10 - 10	45,56	40,84	-4,72	1,11	-5,23	14,8
009 - 45 - 15 - 10	46,32	41,16	-5,16	1,10	-5,67	7,7
009 - 45 - 5 - 0	38,3	34,85	-3,45	1,30	-4,48	27,0
009 - 45 - 5 - 5	41,81	37,84	-3,97	1,20	-4,74	22,8
009 - 45 - 5 - 15	46,18	41,48	-4,70	1,09	-5,13	16,4
009 - 45 - 15 - 0	40,96	36,72	-4,24	1,23	-5,23	14,8
009 - 45 - 15 - 15	47,89	42,49	-5,40	1,06	-5,75	6,4
009 - 45 - 15 - 20	49,11	43,46	-5,65	1,04	-5,88	4,2
009 - 100 - 5 - 0	32,59	30,36	-2,23	1,49	-3,33	45,8
009 - 100 - 15 - 0	35,86	33,34	-2,52	1,36	-3,42	44,3
009 - 100 - 15 - 10	42,27	38,78	-3,49	1,17	-4,07	33,7
009 - 100 - 15 - 15	44,22	40,39	-3,83	1,12	-4,29	30,1
040 - 45 - 10 - 10	46,52	41,48	-5,04	1,09	-5,50	10,4
028 - 45 - 10 - 10	46,21	41,25	-4,96	1,10	-5,44	11,4
018 - 45 - 10 - 10	45,92	41,04	-4,88	1,10	-5,38	12,4

Wärmestromanalyse und Unterscheidung der Wärmestromanteile

Ausgehend vom Wärmestrom des Heizrohrs unter Putz sind in den Diagrammen in Bild 4 die Wärmestromanteile des Referenzeinbaus der Temperierung (ohne Dämmung) abgebildet. Im linken Diagramm sind die Wärmestromanteile an der Außenoberfläche der Außenwand dargestellt. Q_a ist der von der Temperierung zusätzlich ausgehende Wärmestrom nach außen. Im rechten Diagramm ist der Wärmestrom an der Innenoberfläche der Außenwand dargestellt. Q_i bezeichnet den gesamten Wärmestrom der Temperierung nach innen mit den unterscheidbaren Wärmestromanteilen $q_{wH, w \rightarrow i}$ und q_w . Der Wärmestromanteil $q_{wH, w \rightarrow i}$ ist der Wärmestrom der in den Raum abgegeben wird (konvektiv und radiativ) und q_w der Wärmestromanteil der Temperierung der den Wärmestrom

aus dem Raum an die Wand (durch Erhöhung der Oberflächentemperatur) reduziert [17].

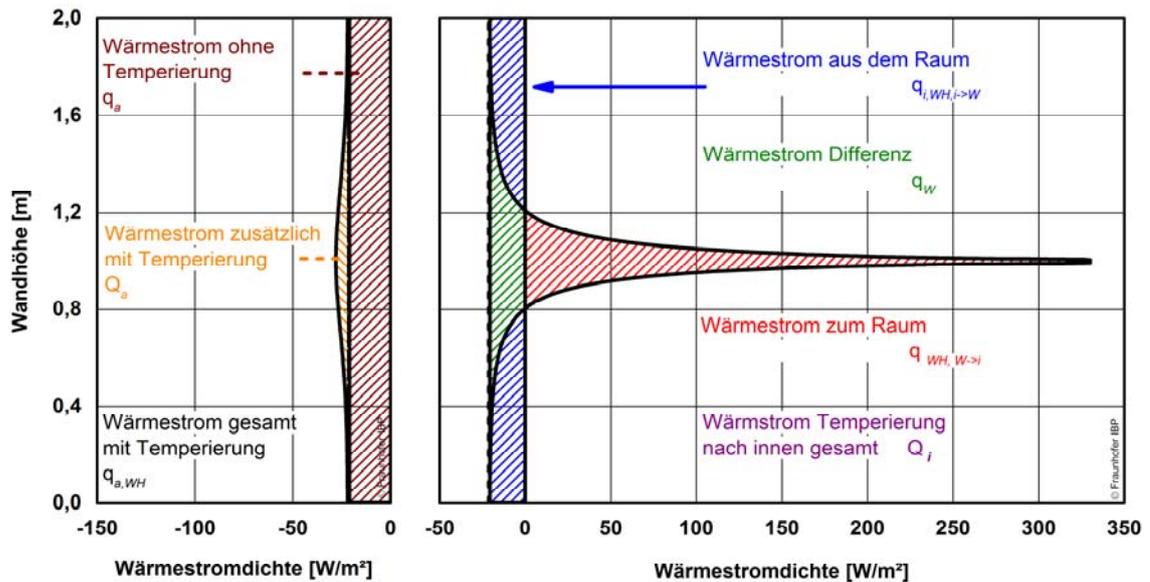


Bild 4:

Wärmestromanalyse ausgehend vom Wärmestrom des Heizrohrs unter Putz. Im linken Diagramm sind die Wärmestromanteile an der Außenoberfläche der Außenwand dargestellt. Q_a ist der von der Temperierung zusätzlich ausgehende Wärmestrom nach außen. Im rechten Diagramm sind die Wärmestromanteile an der Innenoberfläche der Außenwand dargestellt. Q_i bezeichnet den gesamten Wärmestrom der Temperierung nach innen mit den Wärmestromanteilen $q_{WH,W \rightarrow i}$ und q_w .

In den nachfolgenden graphischen Darstellungen (Bild 5 bis Bild 18) sind die Wärmeströme und Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der untersuchten Parameter abgebildet. Es werden dazu die Werte aus den Berechnungen in WUFI® 2D verwendet, die verkürzt in Tabelle 3 aufgelistet sind. Folgende Größen wurden in der Parameterstudie untersucht:

- Abstand des Heizrohrs zur Wandoberfläche (Putzüberdeckung)
- Abstand des Heizrohrs zur Dämmung bei schmalen Dämmstreifen
- Abstand des Heizrohrs zur Dämmung bei breitem Dämmstreifen
- Wärmeleitfähigkeit der Dämmung bei schmalen Dämmstreifen

Abstand des Heizrohrs zur Wandoberfläche (Putzüberdeckung „p“ zwischen Temperierung und Wandoberfläche)

In Bild 5 sind die Wärmeströme ausgehend von der Temperierung in Abhängigkeit zum Abstand des Heizrohres zur Wandoberfläche abgebildet. Die Dämmung ist in einem Abstand von 10 mm zur Heizleitung angeordnet mit einer Abmessung von 20 mm x 45 mm.

Im linken Diagramm sind der Gesamtwärmestrom Q_{ges} sowie die Wärmestromanteile nach innen Q_i und nach außen Q_a abgebildet. Zusätzlich ist zum Vergleich der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{a, Referenz}$ (Temperierung ohne Dämmung) nach außen eingetragen. Alle Varianten haben einen geringeren Wärmestrom nach außen (bei gleicher Vorlauftemperatur). Der Gesamtwärmestrom sowie die Wärmestromanteile nach innen und außen erhöhen sich mit zunehmender Putzüberdeckung. Im rechten Diagramm in Bild 5 sind die Wärmestromanteile nach innen Q_i aufgeteilt nach Wärmeabgabe in den Raum $q_{WH, W \rightarrow i}$ und die Wärmeabgabe q_w , die die Wärmeabgabe aus dem Raum durch die lokale Wanderwärmung reduziert. Der Wärmestromanteil nach innen erhöht sich ebenfalls mit zunehmender Putzüberdeckung. Dabei steigt der Wärmestromanteil in der Wand q_w etwas an, der Wärmestromanteil $q_{WH, W \rightarrow i}$ hingegen bleibt nahezu gleich. Zum Vergleich ist der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{i, Referenz}$ eingetragen. Die Wärmeabgaben der Varianten nach innen sind deutlich niedriger im Vergleich zur Referenz.

Im linken Diagramm in Bild 6 ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, Referenz}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen. Mit zunehmender Putzüberdeckung sinkt der Erhöhungsfaktor für zusätzliche Leitungslänge oder Temperaturerhöhung für die gleiche Wärmeabgabe nach innen. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Wärmeverlust $Q_{a,f}$ nach außen mit zunehmender Putzüberdeckung.

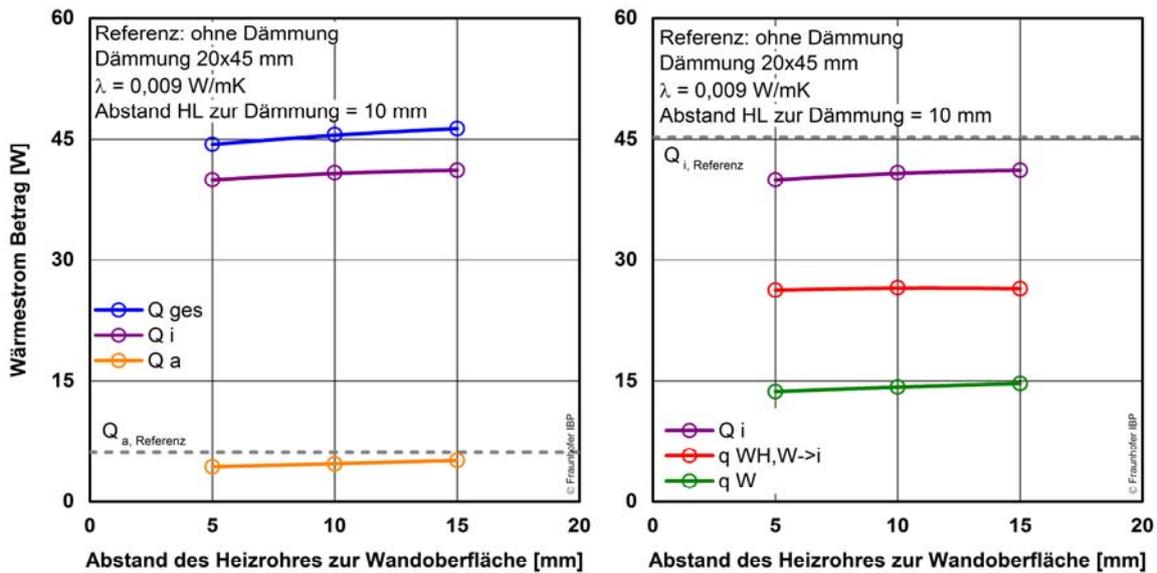


Bild 5:
Gesamtwärmestrom Q_{ges} und die Wärmestromanteile Q_i und Q_a in Abhängigkeit der Temperaturierung zur Wandoberfläche (links). Im rechten Diagramm sind die Wärmestromanteile q_W und $q_{WH, W \rightarrow i}$ des Gesamtwärmestroms nach innen Q_i dargestellt.

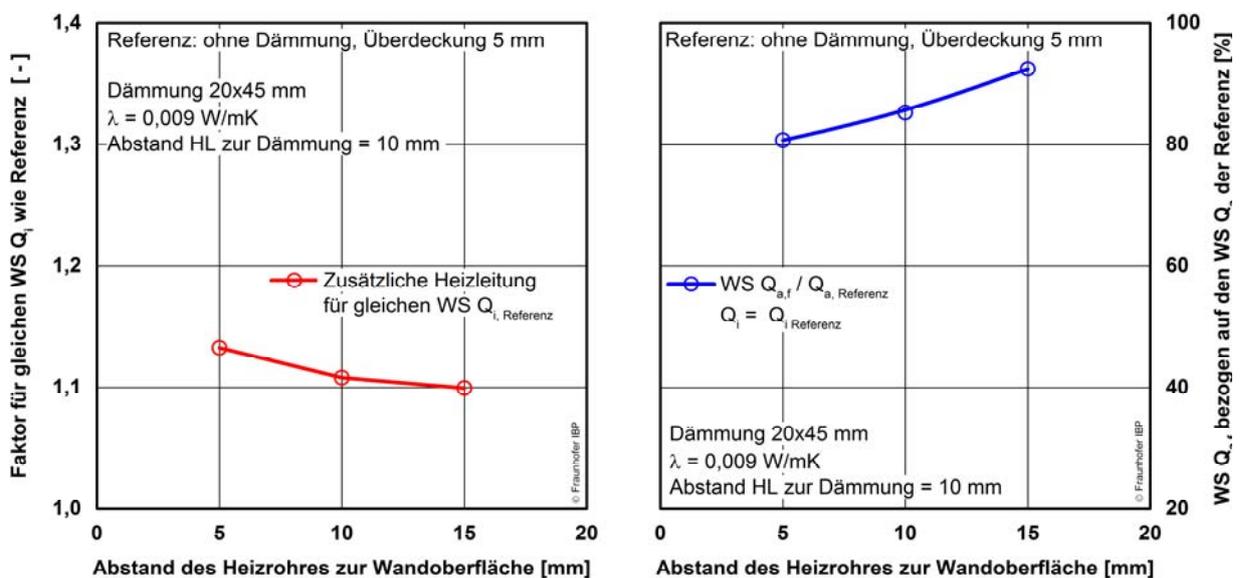


Bild 6:
Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche (links). Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, Referenz}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen.

Das Diagramm in Bild 7 zeigt den Verlauf des Verhältnisses der Wärmestromanteile nach außen, bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Das Verhältnis wird mit zunehmender Putzüberdeckung ungünstiger, bleibt aber noch unter dem Wärmestromverhältnis der Referenz.

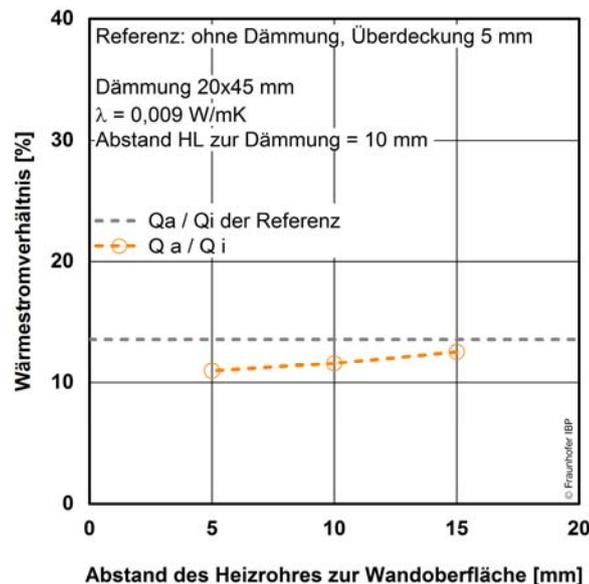


Bild 7: Verlauf des Verhältnisses der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Zusätzlich ist zum Vergleich das Wärmestromverhältnis der Referenz abgebildet.

Abstand „s“ des Heizrohres zur Dämmung bei schmalen Dämmstreifen (4,5 cm breit) mit Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmschicht

In Bild 8 sind die Wärmeströme in Abhängigkeit zum Abstand des Heizrohres zur Dämmschicht abgebildet. Die Temperierung ist in einem Abstand von 15 mm zur Wandoberfläche unter Putz verlegt. Im linken Diagramm sind der Gesamtwärmestrom Q_{ges} sowie die Wärmestromanteile nach innen Q_i und nach außen Q_a abgebildet. Zusätzlich ist zum Vergleich der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{a, Referenz}$ (Temperierung ohne Dämmung) nach außen eingetragen. Alle Varianten haben einen geringeren Wärmestrom nach außen (bei gleicher Vorlauftemperatur). Der Gesamtwärmestrom sowie die Wärmestromanteile nach innen und außen erhöhen sich mit zunehmender Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmung. Im rechten Diagramm in Bild 8 sind die Wärmestromanteile nach innen Q_i aufgeteilt nach Wärmeabgabe in den Raum $q_{WH, W \rightarrow i}$ und die Wärmeabgabe q_w , die die Wärmeabgabe aus dem Raum durch die lokale Wanderwärmung reduziert. Der Wärmestromanteil nach innen erhöht sich ebenfalls mit zunehmender Mörtelschichtdicke. Dabei steigt der Wärmestromanteil in der Wand q_w etwas an, der Wärmestromanteil $q_{WH, W \rightarrow i}$ hingegen deutlich stärker. Zum Vergleich ist der Wärmestromanteil der Referenz

renz $Q_{i, \text{Referenz}}$ eingetragen. Die Wärmeströme nach innen sind bei den Varianten mit Dämmung deutlich niedriger im Vergleich zur Referenz. Erst mit einer Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmung von 20 mm und einer Putzüberdeckung von 15 mm wird nahezu der gleiche Wärmestrom wie bei der Referenz abgegeben.

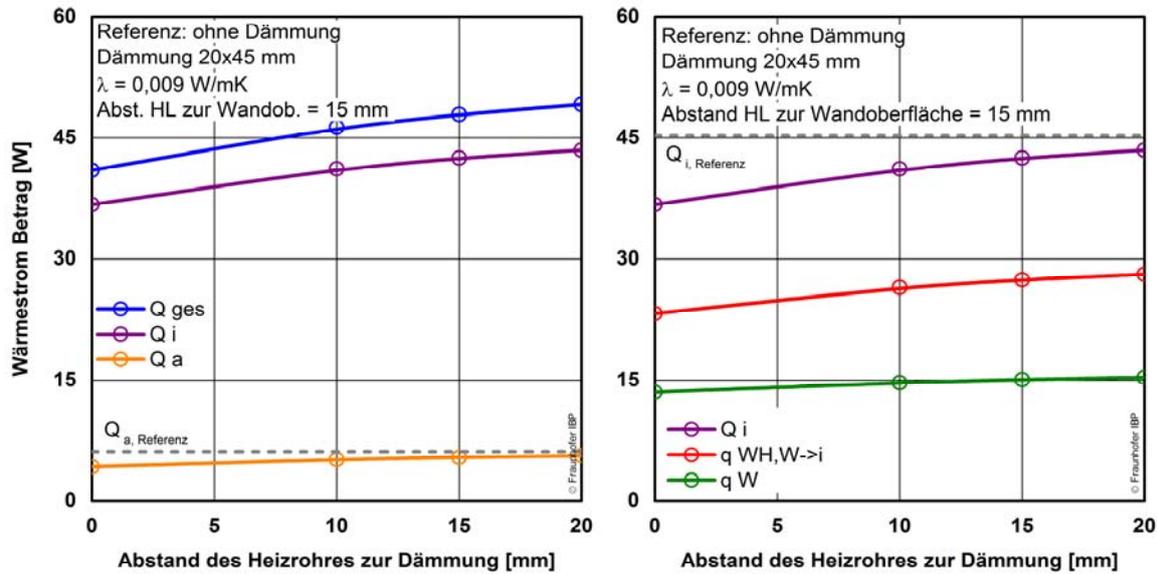


Bild 8:

Gesamtwärmestrom Q_{ges} und die Wärmestromanteile Q_i und Q_a in Abhängigkeit des Abstandes der Temperierung zur Dämmung (links). Im rechten Diagramm sind die Wärmestromanteile q_W und $q_{\text{WH, W->i}}$ sowie des Gesamtwärmestroms nach innen Q_i dargestellt.

Im linken Diagramm in Bild 9 ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Dämmschicht abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, \text{Referenz}}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen. Mit zunehmendem Abstand wird eine geringere zusätzliche Leitungslänge für die gleiche Wärmeabgabe benötigt. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch der Wärmeverluste $Q_{a,f}$ nach außen mit zunehmender Dicke der Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmung.

Das Diagramm in Bild 10 zeigt den Verlauf des Verhältnisses der Wärmestromanteile nach außen, bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Das Verhältnis wird mit zunehmendem Abstand ungünstiger, bleibt aber noch unter dem Wärmestromverhältnis der Referenz.

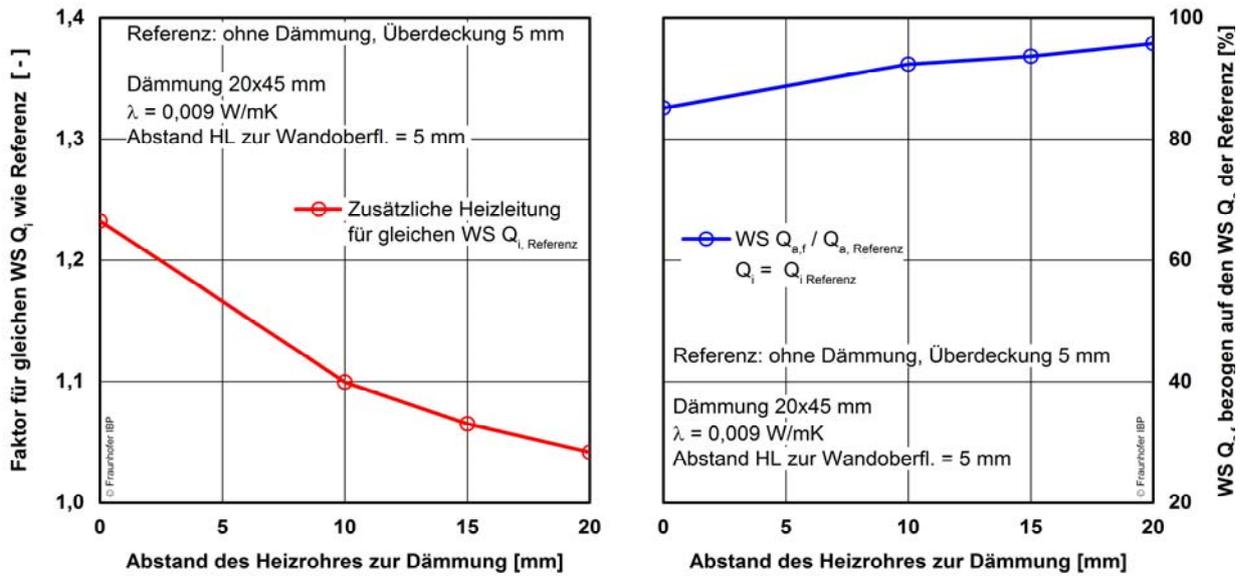


Bild 9:

Im linken Diagramm ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, \text{Referenz}}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen.

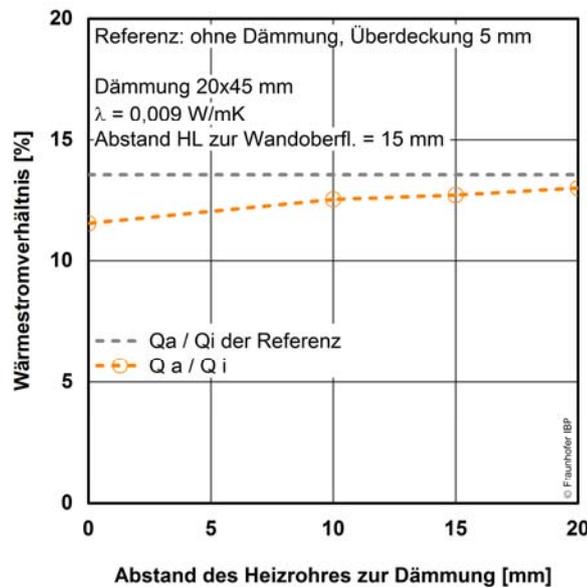


Bild 10:

Verhältnis der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Zusätzlich ist zum Vergleich das Wärmestromverhältnis der Referenz abgebildet.

Abstand „s“ des Heizrohrs zur Dämmung bei breitem Dämmstreifen (10 cm breit) mit Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmschicht

In Bild 11 sind die Wärmeströme in Abhängigkeit zum Abstand des Heizrohres bei einer breiten Dämmschicht abgebildet. Die Temperierung ist in einem Abstand von 15 mm zur Wandoberfläche unter Putz verlegt. Im linken Diagramm sind der Gesamtwärmestrom Q_{ges} sowie Wärmestromanteile nach innen Q_i und nach außen Q_a abgebildet. Zusätzlich ist zum Vergleich der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{a, Referenz}$ (Temperierung ohne Dämmung) nach außen eingetragen. Alle Varianten haben einen deutlich geringeren Wärmestrom nach außen (bei gleicher Vorlauftemperatur). Der Gesamtwärmestrom sowie die Wärmestromanteile nach innen und außen erhöhen sich mit zunehmender Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmung. Im rechten Diagramm in Bild 11 sind die Wärmestromanteile nach innen Q_i aufgeteilt nach Wärmeabgabe in den Raum $q_{WH, W \rightarrow i}$ und die Wärmeabgabe q_w , die die Wärmeabgabe aus dem Raum durch die lokale Wanderwärmung reduziert. Der Wärmestromanteil nach innen erhöht sich ebenfalls mit zunehmender Mörtelschichtdicke. Dabei steigt der Wärmestromanteil in der Wand q_w sowie der Wärmestromanteil $q_{WH, W \rightarrow i}$ in etwa gleich an. Zum Vergleich ist der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{i, Referenz}$ eingetragen. Die Wärmeabgabe der Varianten nach innen ist deutlich niedriger im Vergleich zur Referenz.

Im linken Diagramm in Bild 12 ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohen Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohrs zur Dämmschicht abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnisses der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, Referenz}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen. Mit zunehmendem Abstand wird eine geringere zusätzliche Leitungslänge für die gleiche Wärmeabgabe benötigt. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Wärmeverluste $Q_{a,f}$ nach außen mit zunehmender Dicke der Mörtelschicht zwischen Temperierung und Dämmung, die hier jedoch sehr niedrig sind im Vergleich zur Referenz.

Das Diagramm in Bild 13 zeigt den Verlauf des Verhältnisses der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Das Verhältnis wird mit zunehmendem Abstand ungünstiger, bleibt aber mit großem Abstand unter dem Wärmestromverhältnis der Referenz.

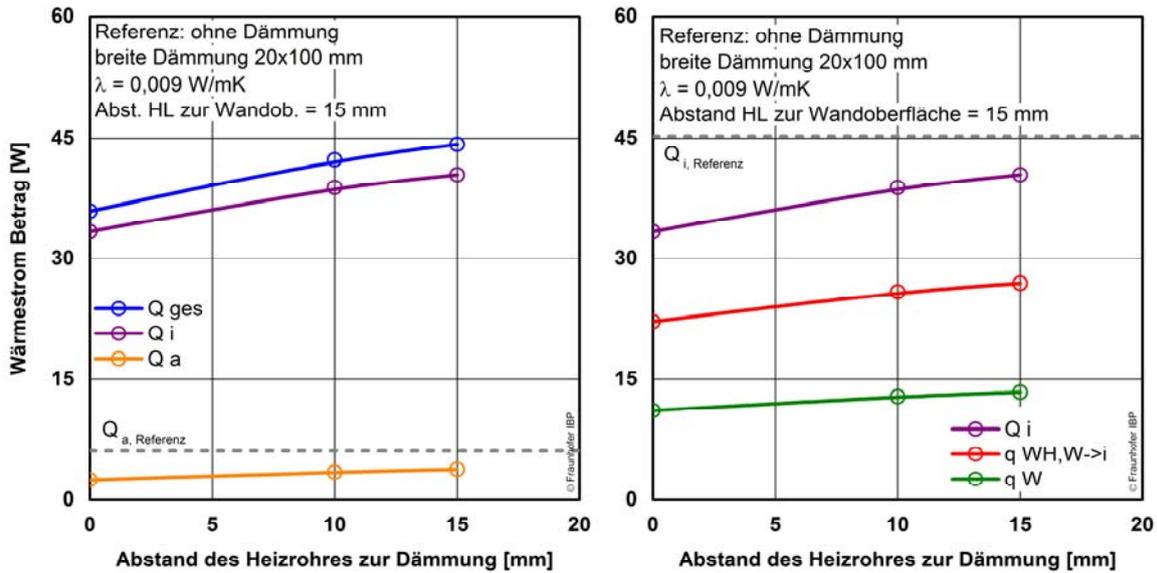


Bild 11:
Gesamtwärmestrom Q_{ges} und die Wärmestromanteile Q_i und Q_a in Abhängigkeit des Abstandes der Temperatur zu einer breiteren Dämmung (links). Im rechten Diagramm sind die Wärmestromanteile q_W und $q_{WH, W \rightarrow i}$ des Gesamtwärmestroms nach innen Q_i dargestellt.

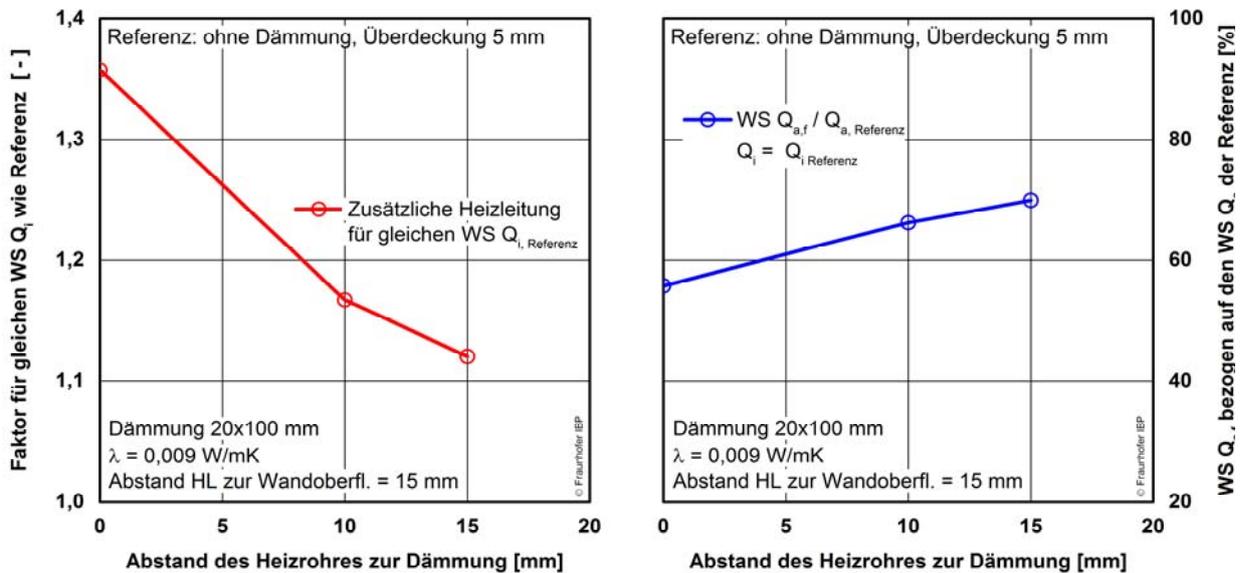


Bild 12:
Im linken Diagramm ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a,Referenz}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen.

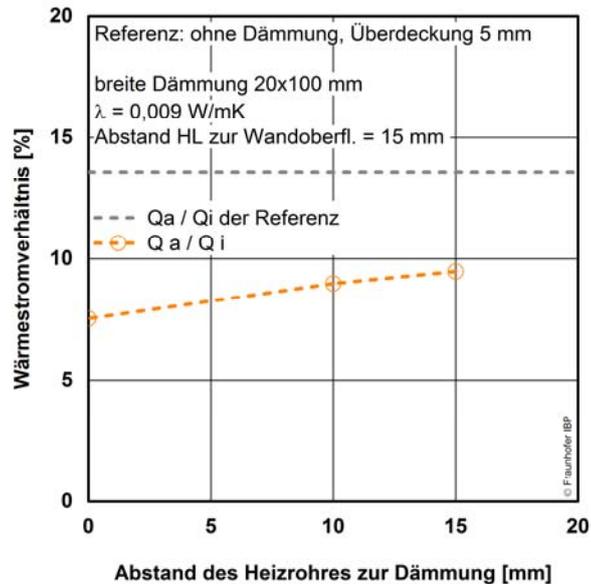


Bild 13:
Verhältnis der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Zusätzlich ist zum Vergleich das Wärmestromverhältnis der Referenz abgebildet.

Wärmeleitfähigkeit „ λ “ der Wärmedämmung bei schmalen Dämmstreifen (4,5 cm)

In Bild 14 sind die Wärmeströme in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei einer schmalen Dämmschicht abgebildet. Die Temperierung ist in einem Abstand von 10 mm zur Wandoberfläche und im Abstand von 10 mm zur Dämmschicht verlegt. Im linken Diagramm sind der Gesamtwärmestrom Q_{ges} sowie Wärmestromanteile nach innen Q_i und nach außen Q_a abgebildet. Zusätzlich ist zum Vergleich der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{a, Referenz}$ (Temperierung ohne Dämmung) nach außen eingetragen. Alle Varianten haben einen deutlich geringeren Wärmestrom nach außen (bei gleicher Vorlauftemperatur). Der Gesamtwärmestrom sowie die Wärmestromanteile nach innen und außen erhöhen sich kaum mit höherer Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung. Im rechten Diagramm in Bild 14 sind die Wärmestromanteile nach innen Q_i aufgeteilt nach Wärmeabgabe in den Raum $q_{WH, W \rightarrow i}$ und die Wärmeabgabe q_w , die die Wärmeabgabe aus dem Raum durch die lokale Wandwärmung reduziert. Der Wärmestromanteil nach innen erhöht sich ebenfalls kaum mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit. Zum Vergleich ist der Wärmestromanteil der Referenz $Q_{i, Referenz}$ eingetragen. Die Wärmeabgabe der Varianten nach innen ist deutlich niedriger im Vergleich zur Referenz.

Im linken Diagramm in Bild 15 ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohen Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnisses der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, Referenz}$ bei gleichem

Wärmestrom nach innen aufgetragen. Mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit wird eine etwas kleinere zusätzliche Leitungslänge für die gleiche Wärmeabgabe benötigt. Gleichzeitig erhöhen sich die Wärmeverluste $Q_{a,f}$ nach außen geringfügig mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht.

Das Diagramm in Bild 16 zeigt den Verlauf des Verhältnisses der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Das Verhältnis verändert sich kaum mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit, bleibt aber deutlich unter dem Wärmestromverhältnis der Referenz.

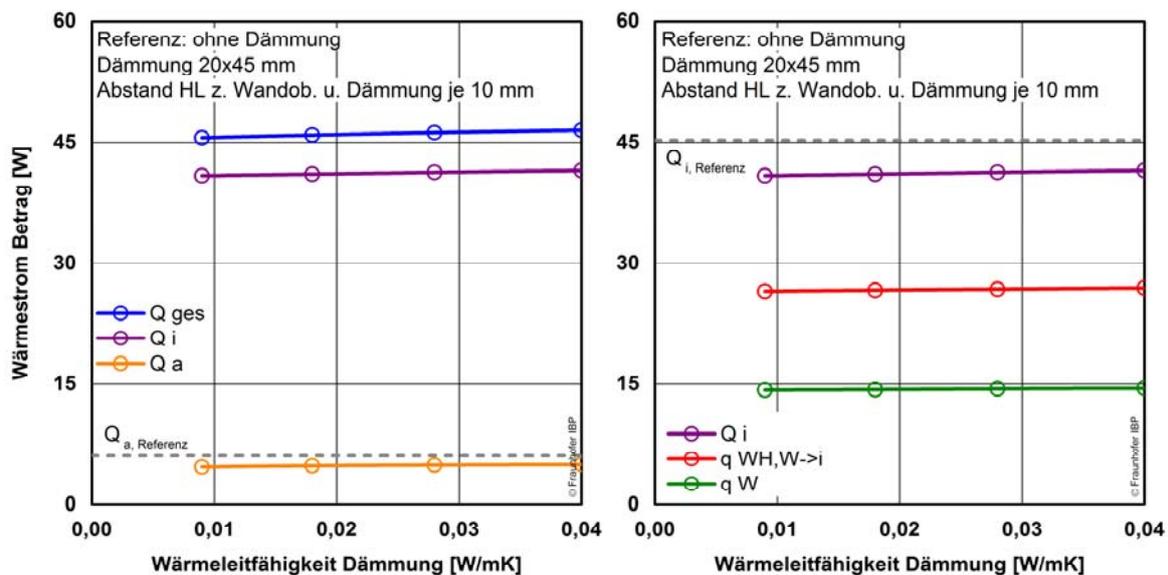


Bild 14: Gesamtwärmestrom Q_{ges} und die Wärmestromanteile Q_i und Q_a in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung (links). Im rechten Diagramm sind die Wärmestromanteile q_W und $q_{WH, W \rightarrow i}$ des Gesamtwärmestroms nach innen Q_i dargestellt.

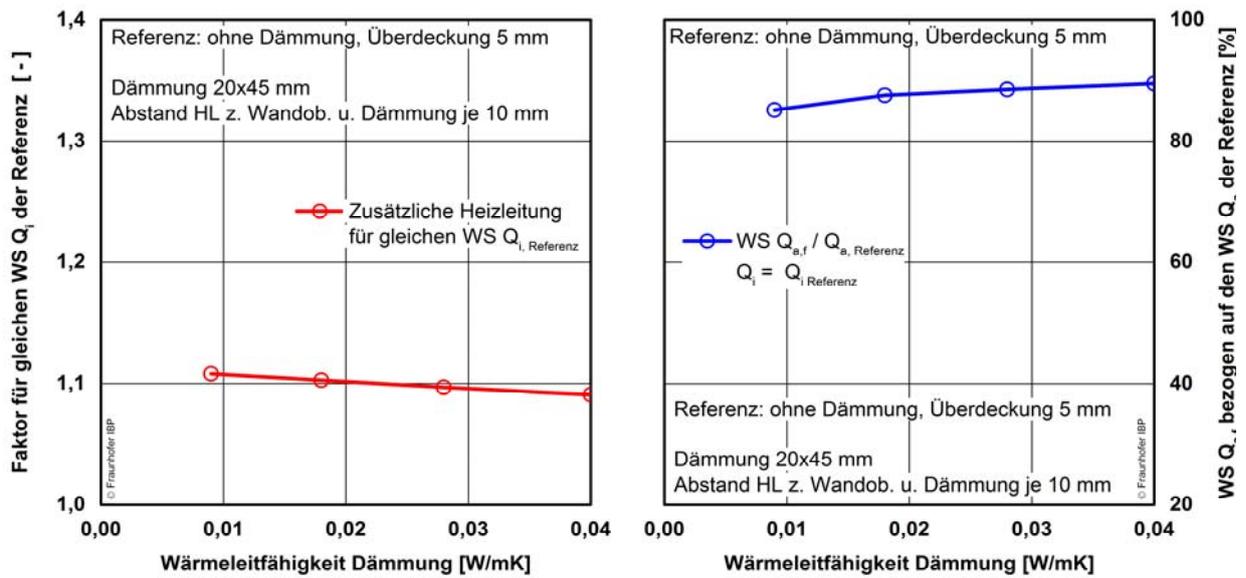


Bild 15:

Im linken Diagramm ist der Verlauf des Faktors für eine zur Referenz gleich hohe Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche abgebildet. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Verhältnis der Wärmeströme nach außen $Q_{a,f} / Q_{a, Referenz}$ bei gleichem Wärmestrom nach innen aufgetragen.

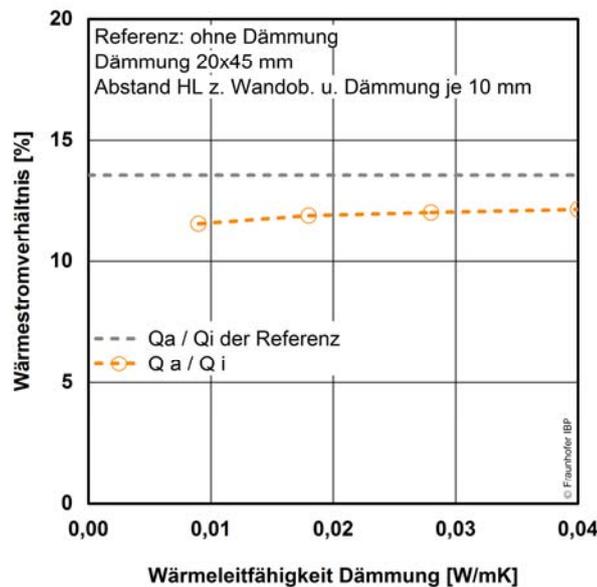


Bild 16:

Verhältnis der Wärmestromanteile nach außen bezogen auf den nach innen Q_a / Q_i in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Zusätzlich ist zum Vergleich das Wärmestromverhältnis der Referenz abgebildet.

Zusammenfassung und Übersicht der Parameterstudie

Alle untersuchten Varianten mit Dämmung haben einen geringeren Wärmestrom nach außen im Vergleich zur Referenz ohne Wärmedämmung. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Anordnung und Wärmeleitfähigkeiten wurden in gesonderten Diagrammen dargestellt. Die Bauteilgeometrie und mögliche Ausführung der Dämmung sind durch bauliche Gegebenheiten und denkmalpflegerische Vorgaben bestimmt.

Für den Parameter „p“ Putzüberdeckung ergeben sich die geringsten Wärmeverluste nach außen je näher das Heizrohr an der Innenoberfläche montiert ist bzw. je größer die Wanddicke zwischen Heizrohr und Außenoberfläche ist. Die Begrenzung der Putzüberdeckung ist in erster Linie bautechnisch begründet. Bei kleinen Rohrdurchmessern sind minimale Überdeckungen von 5 mm möglich.

Die Schichtdicke „s“ zwischen Heizrohr und Wärmedämmung wirkt sich erheblich auf die Gesamtwärmeabgabe aus. Im Extremfall mit Schichtdicke 0 mm beträgt die Wärmeabgabe nur noch rund $\frac{3}{4}$ im Vergleich zum Einbau ohne Dämmung. In der Folge reduzieren sich auch die Wärmestromanteile nach außen und nach innen. Die Verringerung der Wärmeabgabe nach innen machen zusätzliche Leitungen oder alternativ eine Erhöhung der Vorlauftemperatur erforderlich, insbesondere bei direktem Einbau der Heizleitung auf die Wärmedämmung. Mit zunehmender Schichtdicke „s“ verringert sich der Effekt der Energieeinsparung deutlich.

Der Einfluss des Dämmstreifens wird mituntersucht, indem die Parameteruntersuchung zur Schichtdicke „s“ mit breiterem Dämmstreifen (10 cm anstatt 4,5 cm) wiederholt wird. Der Einbau einer breiten Dämmung ist jedoch für die Temperierung aus baulichen und denkmalpflegerischen Gesichtspunkten i. d. R. unrealistisch. Wie bei dem schmalen Dämmstreifen ergibt sich die größte Energieeinsparung von nahezu 55 % ohne Zwischenschicht mit direkter Montage auf die Wärmedämmung. Um die gleiche Wärmeabgabe nach innen zu erhalten, muss allerdings die Leitungslänge auch nahezu um $\frac{1}{3}$ verlängert werden. Es zeigt sich insgesamt ein ähnliches Verhalten wie mit schmaler Dämmung.

Für die Untersuchung hinsichtlich der Geometrie wurde der bestmögliche Dämmstoff (VIP) gewählt. Erst nach Festlegung einer günstigen bzw. realistischen Geometrie wurden die Auswirkungen der Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes einbezogen. Dabei zeigt sich bei der gewählten Geometrie mit einer Putzüberdeckung „p“ von 10 mm und Schicht „s“ von 10 mm nur eine geringe Änderung der Wärmeabgabe der Temperierung sowie eine geringe Verbesserung der Effizienz bei Einsatz eines Dämmmaterials mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit.

In Bild 17 sind alle Varianten aus Tabelle 3 im Balkendiagramm dargestellt. Blau gestrichelt eingerahmt ist die Variante, die für den Einbau vorgeschlagen wird. Aus baupraktischen Überlegungen wird ein Wärmedämmputz mit Aerogelzu-

schlag mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,028 W/m²K empfohlen. Durch das Ausstemmen des Schlitzes entstehen Unebenheiten im Mauerwerk, die mit einem Dämmputz in einem Arbeitsgang (Ausgleichsschicht und Dämmschicht) ausgeführt werden können. Für die Zwischenschicht „s“ und Putzüberdeckung „p“ werden jeweils 10 mm vorgeschlagen, um das Heizrohr ein einer ausreichend dicken Mörtelschicht einzubetten. Damit soll eine schadensfreie (rissfreie) Putzoberfläche gewährleistet werden können.

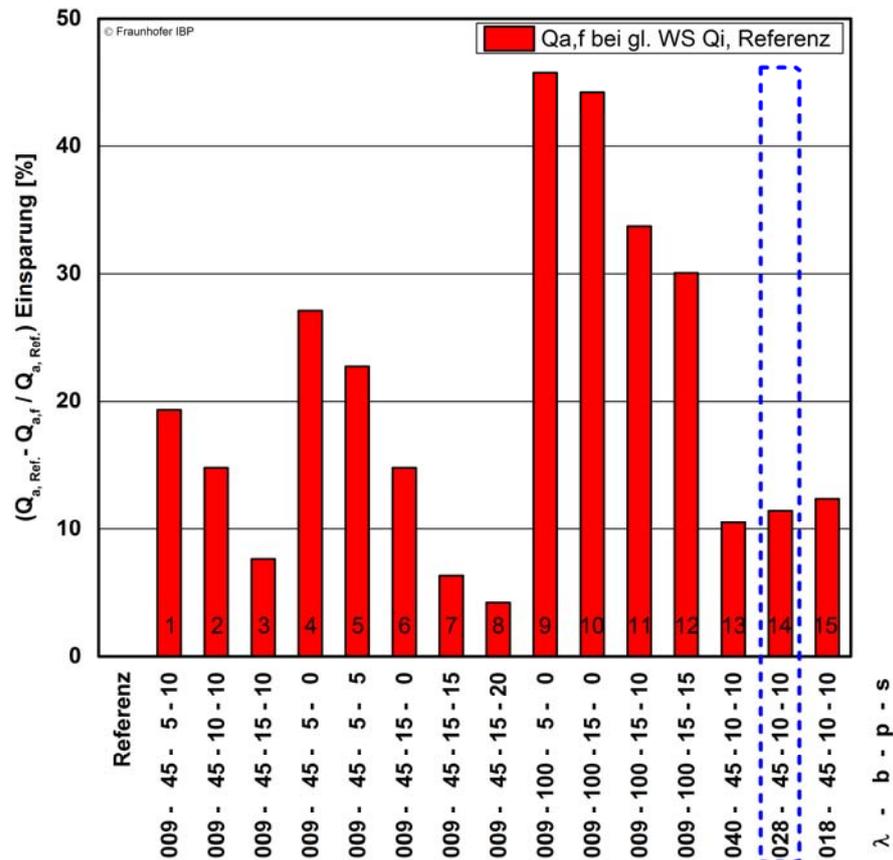


Bild 17: Reduzierung des Wärmestroms nach außen aller Varianten aus Tabelle 3 als Balkendiagramm. Blau gestrichelt eingerahmt ist die Variante, die für den Einbau vorgeschlagen wird.

In dem Diagramm in Bild 18 ist die Einsparung der einzelnen Varianten zu dem berechneten Faktor f_{Q_i} für eine gleiche Wärmeabgabe nach innen Q_i wie die Referenz abgebildet. Die Referenz (Temperierung ohne Dämmung) hat gemäß Definition einen Faktor f_{Q_i} von 1. Alle untersuchten Varianten mit Dämmung zeigen eine Energieeinsparung (verursachen einen geringeren Wärmestrom nach außen), benötigen dazu aber eine größere Länge an Heizleitung (bzw. höhere Vorlauftemperatur), um die gleiche Wärmeabgabe Q_i nach innen (Wärmestrom) zu erreichen. Betrachtet man nur die baupraktisch und denkmalpflegerisch relevanten Lösungen (schmale Dämmung) zeichnet sich ein Lösungsfeld zwischen 11 % und 16 % Einsparung (geringere direkte Wärme-

verluste) bei einem Faktor von 1,09 bis 1,11 für die erforderliche Mehrlänge ab, siehe rotes Oval in Bild 18.

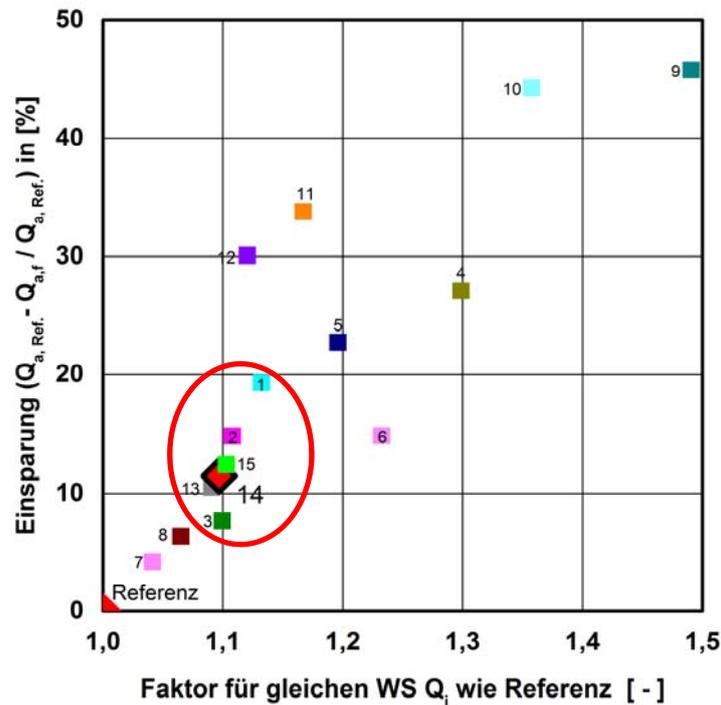


Bild 18: Einsparung der direkten Wärmestromverluste der einzelnen Varianten in Abhängigkeit von dem damit verbundenen berechneten Faktor f_{Qi} für eine gleiche Wärmeabgabe nach innen wie die Referenz. Die empfohlene Ausführungsvariante ist hervorgehoben (14).

2.3 Einbau der Temperierung und Leitungslänge

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden im Obergeschoss des ehemaligen Klosters im Südostflügel sechs Räume identifiziert, die im Wesentlichen gleich ausgeführt sind. Zur Überprüfung und Dokumentation wurde der Einbau der innovativen und energieeffizienten Temperierung in drei Räumen vorgesehen. Für den direkten Vergleich wurden in den verbleibenden drei Räumen die Temperierung in konventioneller Einbauweise ohne Wärmedämmung eingebaut.

Für den Einbau der Grundvariante der Temperierung erfolgten Vorgaben zur genauen Positionierung der Heizleitung unter Putz. In der Fensterlaibung erfolgt der Einbau im vorderen Drittel (zum Raum hin) der Laibung. In der Wandfläche wurde die horizontale Vor- und Rücklaufleitung entsprechen den baulichen Gegebenheiten angepasst. Für eine ausreichende Wärmeabgabe erfolgte die Verlegung der Temperierleitung mit zusätzlichen Mäandern in der Nische.

Die Breite und Tiefe des Schlitzes wird durch bauliche Gegebenheiten und denkmalpflegerischen Gesichtspunkten begrenzt. Zum einen ist ein möglichst geringer Eingriff in die denkmalgeschützte Bausubstanz vorgegeben. Zum anderen ist baupraktisch aus z.B. statischen Gründen die Schlitztiefe begrenzt (vor allem im Sturzbereich). Weiter ist auch aus Kostengründen die Schlitztiefe und Breite nicht beliebig ausführbar.

Aus baupraktischen Überlegungen sind Beschränkungen und Vereinfachungen mit in den Ausführungsvorschlag eingeflossen, der bei einem gemeinsamen Arbeitstreffen diskutiert wurde. Im Ergebnis wurde vereinbart, dass für den Einbau der Temperierschleife im Sockelbereich die Dämmschicht nicht unterbrochen ausgeführt wird, d.h. der Wandschlitz wurde entsprechend breit ausgestemmt. Dies war aus denkmalpflegerischen Gesichtspunkte hier vertretbar. Die Einbindung der zusätzlichen Temperierschleife in der Fensternische erfolgt geregelt über ein Thermostat. Die Heizschleife wird bei Bedarf über den Regler hinzugeschaltet. Zur Erhöhung der Wirkung der Laibungsschleife und Kompensation der geringeren Wärmeabgabe durch die Wärmedämmung wird im Bereich der Nische ein zusätzlicher Bogen määnderartig verlegt. Es ergibt sich eine nahezu vollflächige Belegung der Nische mit Heizschleifen. Deshalb wird eine vollflächige Dämmschicht in der Nische vorgesehen. Die nachfolgende Darstellung in Bild 19 zeigt die Ausführungsplanung für den optimierten und energiesparenden Einbau der Temperierung in der Wandansicht und dem horizontalem Schnitt auf Höhe der Fensternische sowie in Bild 20 die Detailvorgaben für die Ausführung im Schlitz.

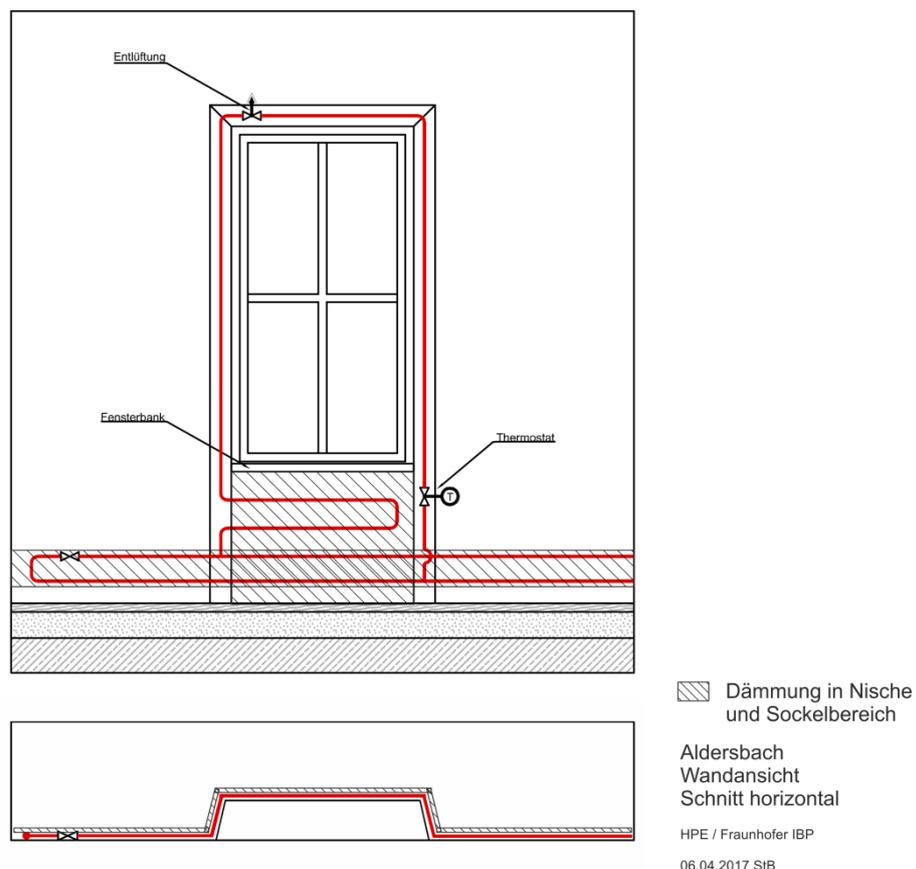


Bild 19:

Ansicht der Außenwand und Schnitt durch Regelquerschnitt der Außenwand mit Anordnung der Temperierung. Die Schraffierung zeigt den Bereich der Dämmung im Sockel und Nische (Quelle: HPE/ IBP).

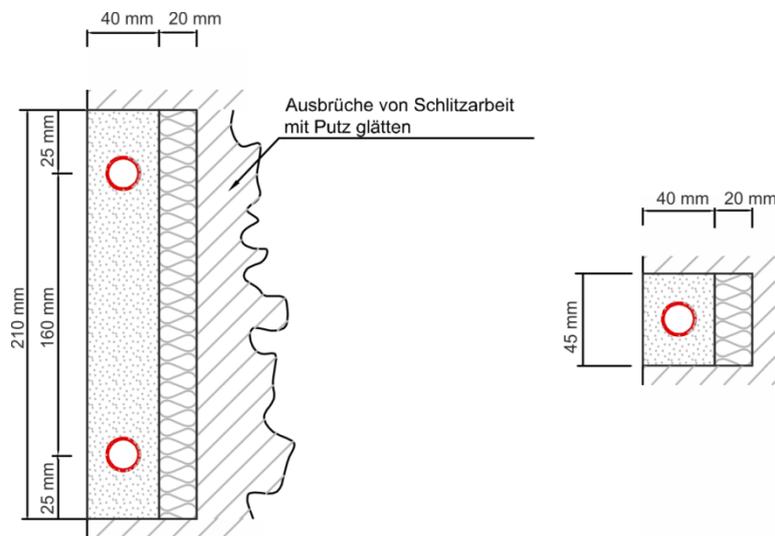


Bild 20:

Planung zur Detailausführung der Wandschlitzte. Links mit Verlegung der Temperierung mit Dämmung im Sockel mit breitem Schlitz und rechts Verlegung der Temperierung mit Dämmung in einem schmalen Schlitz (Laibung).

Die eingebaute Länge der Heizleitung wurde für die Heizschleife der Räume mit Wärmedämmung (Zimmer 2.26 bis 2.28) hinter der Heizleitung auf gesamt 59,2 m bestimmt. Davon wurden 31 lfm für die Sockelschleife eingebaut und 28,2 lfm für die je Fenster hinzuschaltbaren Laibungsschleifen.

Für die drei Räume ohne Wärmedämmung (Zimmer 2.29 bis 2.31) wurde in den Laibungen die gleiche Heizleitungslänge verbaut. Die Sockelschleife ist mit 31,9 m geringfügig um 0,9 m länger. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 60,1 m.

Für beide Temperierschleifen (gedämmt und nicht gedämmt) wurde die wärmegegedämmt Anbindeleitung vom Wärmemengenzähler bis zur Außenwand anteilig mit berücksichtigt.

2.3.1 Dokumentation Einbau der Temperierung mit Dämmung

Die Dokumentation des Einbaus erfolgte durch das Ingenieurbüro HPE, die auch mit der Bauüberwachung beauftragt war. Die nachfolgenden Bilder wurden von der Fa. HPE bereitgestellt. Bild 21 bis Bild 25 zeigen die gestemmten Schlitzte mit bereits verlegter Wärmedämmung an den vorgesehenen Positionen in den Zimmern 2.26 bis 2.28.

In Bild 21 ist die fertig gedämmte Fensternische abgebildet. Der höher gelegene, nicht gedämmte, waagrechte Schlitz ist zur Aufnahme der Elektroinstalla-

tion vorgesehen. In Bild 22 ist eine Detailaufnahme mit Abmessung der Dämmung dargestellt. Die Detailausführung in der Fensterlaibung ist am Beispiel Raum 2.27 mit Wärmedämmputz und Sturzbereich ohne Dämmung in Bild 23 gut erkennbar. Die vorgegebene Aufbauhöhe für den Innenputz mit 40 mm zur Aufnahme der Heizleitungen wurden eingehalten und dokumentiert (Bild 24). Bild 25 zeigt die Übersicht der Stemm- und Wärmedämmarbeiten an der Außenwand im Raum 2.28.



Bild 21:
Ansicht der Fensternische im Zimmer 2.26 mit bereits eingebauter XPS Dämmplatte. Die waagrechten Schlitze in halber Höhe der Nische sind für die Elektroinstallation (Bild: HPE).



Bild 22:
Detailaufnahme der Sockelsituation in Zimmer 2.26. Die Dämmstoffdicke beträgt 2 cm. (Bild: HPE).



Bild 23:
Vorbereitete Wandschlitz in der Fensterlaibung in Zimmer 2.27 mit bereits aufgetragenem Dämmputz. Der Schlitz im Sturz verbleibt aus statischen Gründen ungedämmt, da mit Dämmung der Schlitz tiefer eingearbeitet werden müsste und damit den Sturzbalken schwächen würde (Bild: HPE).



Bild 24:
Detailaufnahme in der Fensternische in Zimmer 2.27. Die Nische ist mit Dämmputz 2 cm dick gedämmt. In den weiteren Putzaufbau mit 4 cm mit normalem Wandputz werden die Temperierrohre DN 18 mittig eingeputzt (Bild: HPE).



Bild 25:
Unterer Wandbereich in Zimmer 2.28 mit bereits aufgetragenem Dämmputz in der Nische und im Bereich der Temperierung im Sockel (Bild: HPE).

2.3.2 Grundvariante ohne zusätzliche Dämmung

Bild 26 bis Bild 28 zeigen die gestemmtten Schlitze an den vorgesehenen Positionen in den Zimmern 2.29 bis 2.31.

In Bild 26 ist die fertig vorbereitete Fensternische sowie für den Einbau vorbereitete Schlitze im Sockelbereich abgebildet. Der höher gelegene waagrechte Schlitz ist zur Aufnahme der Elektroinstallation vorgesehen. Bild 27 zeigt eine Detailaufnahme der vorbereiteten Schlitze im Zimmer 2.29. Die Schlitze wurden 4 cm x 4 cm groß hergestellt. Der Achsabstand der Temperierleitung beträgt ca. 16 cm. In Bild 28 sind zwei Fotos von einem Fenster mit umlaufender Schlitzzung abgebildet. Die Anordnung der Schlitze erfolgte in etwa im inneren Drittel der Laibung.



Bild 26:
Wandansicht mit Fenster im Zimmer 2.29. Die Temperierleitungen sind im Sockel angebracht (untere zwei Schlitze). Der obere Schlitz ist für die Elektroinstallation vorgesehen. Die Temperierung wird konventionell, d.h. ohne Dämmung, eingeputzt (Bild: HPE).



Bild 27:
Detailaufnahme der vorbereiteten Schlitze im Zimmer 2.29. Die Schlitze wurden 4 cm x 4 cm groß hergestellt. Der Abstand der Temperierleitung beträgt ca. 16 cm im Achsmaß. Die Temperierung wird konventionell, d.h. ohne Dämmung, eingeputzt (Bild: HPE).



Bild 28:
Ansicht der linken und rechten Laibungsseite mit den vorbereiteten Schlitzen in der Fensterlaibung im Zimmer 2.30. Die Schlitze wurden 4 cm x 4 cm groß hergestellt. Die Temperierung wird konventionell, d.h. ohne Dämmung, eingeputzt (Bild: HPE).

3 Messtechnische Untersuchungen

Für die messtechnischen Untersuchungen wird im Obergeschoss der Einbau der innovativen und energieeffizienten Temperierung in drei Räumen vorgenommen. Für den direkten Vergleich wird die Temperierung in konventioneller Einbauweise ohne Wärmedämmung ebenfalls in drei Räumen eingebaut, siehe Bild 29.

3.1 Messkonzept

Das Messkonzept sieht neben den wesentlichen Raumluftwerten Temperatur und relative Feuchte auch die Erfassung weiterer Temperaturen am Mauerwerk vor. Es wird dazu in jedem Raum die Temperatur an der Heizleitung der zusätzlichen Heizschleife in der Fensterlaibung aufgezeichnet. In jeweils einem Raum (Raum 2.27 mit Dämmung; Raum 2.30 ohne Dämmung) werden zusätzlich die Temperaturen an der Innenoberfläche direkt über der Temperierung und unter der Wärmedämmung bzw. in gleicher Schichttiefe erfasst, siehe Bild 29 bis Bild 31.

Zusätzlich wird die Energiemenge mit Vor- und Rücklauftemperatur und Durchflussmenge für die jeweiligen drei Räumen aufgezeichnet. Die Messung der Wärmemenge erfolgt mit einem Wärmemengenzähler Typ Integral-V UltraLite Fabrikat Allmess. Die automatisch integrierten Wärmemengen werden in einem 5-Minuten Intervall mit den anderen Messwerten ausgelesen und in eine Datenbank der Firma HPE übertragen. Von dort aus erfolgt die Weiterleitung an das Fraunhofer IBP. Die Messdaten werden dort in die Datenbank IMEDAS® abgespeichert und verwaltet.

Die Bezeichnung und Zuordnung der Messstellen im Messplan und die verwendeten Sensoren sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

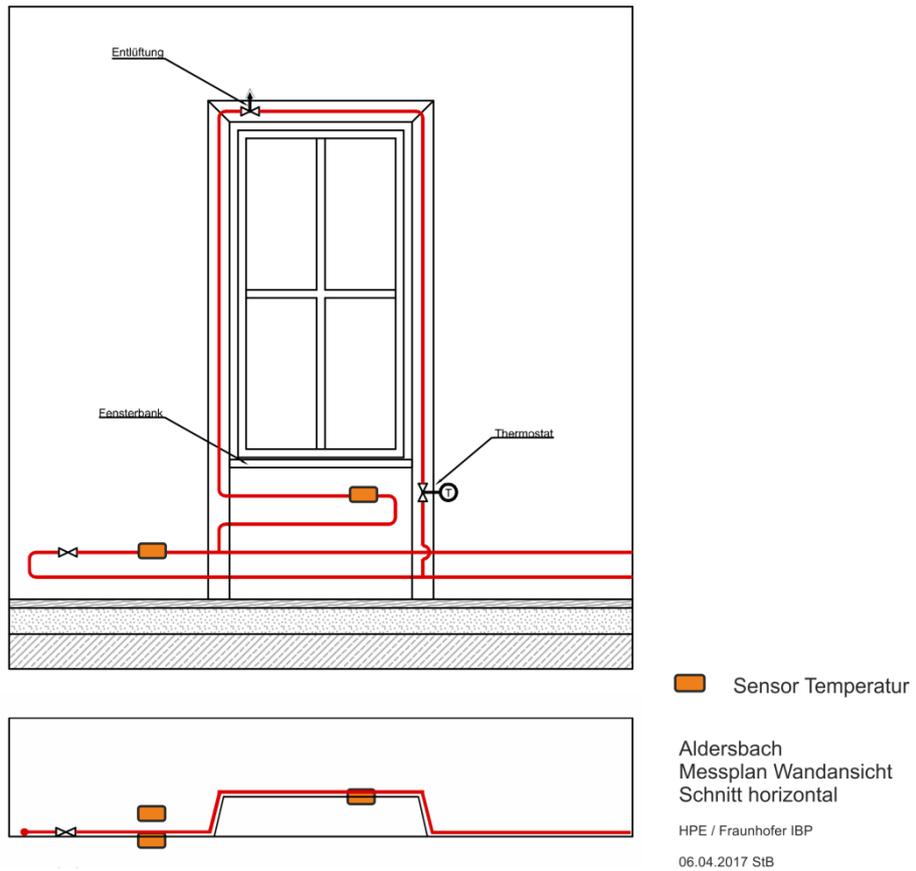


Bild 31:
 Ansicht der Außenwand und Schnitt durch den Regelquerschnitt der Außenwand mit Anordnung der Temperierung und Positionierung der Sensoren (Quelle HPE/ Fraunhofer IBP).

Tabelle 4:
Bezeichnung und Zuordnung der Messstellen im Messplan und der verwendeten Sensoren.

Messort	Messplan Nr.	Bezeichnung	Messgröße
Außen	1	Außenluft	rF, T
Flur	2	Raumluft	rF, T
Raum 2.26	3	Raumluft	rF, T
Raum 2.26	4	T Heizleitung Lai- bung	T
Raum 2.27	5	Raumluft	rF, T
Raum 2.27	6	T Heizleitung Lai- bung	T
Raum 2.27	7	T Oberfläche Wand innen	T
Raum 2.27	8	T Wand hinter Dämmung	T
Raum 2.28	9	Raumluft	rF, T
Raum 2.28	10	T Heizleitung Lai- bung	T
Raum 2.29	11	Raumluft	rF, T
Raum 2.29	12	T Heizleitung Lai- bung	T
Raum 2.30	13	Raumluft	rF, T
Raum 2.30	14	T Heizleitung Lai- bung	T
Raum 2.30	15	T Oberfläche Wand innen	T
Raum 2.30	16	T Wand hinter Dämmung	T
Raum 2.31	17	Raumluft	rF, T
Raum 2.31	18	T Heizleitung Lai- bung	T
Verteiler WMZ 1 (HL mit Wärme- dämmung)	19	Wärmemenge, Durchfluss, T Vor- und Rücklauf	p, q, T, T
Verteiler WMZ 2 (HL ohne Wär- medämmung)	20	Wärmemenge, Durchfluss, T Vor- und Rücklauf	p, q, T, T

3.2 Messdaten Dauermessung

Die Bereitstellung und Installation der Sensoren erfolgte durch die Firma HPE. Über einen programmierbaren Datenlogger (SPS) wurden die Messdaten aufgezeichnet und über Internet an das Fraunhofer IPB weitergeleitet. Die Daten werden in die am IBP entwickelte Datenbank IMEDAS® importiert und dauerhaft gespeichert. Die am Fraunhofer IBP vorliegenden Daten werden nachfolgend ausgewertet und graphisch dargestellt. Die Messungen werden in einem Intervall von 15 Minuten aufgezeichnet. Die Leistungsmessungen erfolgen mit Wärmemengenzählern mit automatischem Rechenwerk zur Berechnung der Wärmemenge. Die Momentanwerte der Wärmemengenzähler werden ebenfalls in einem 15 Minuten Intervall abgefragt und aufgezeichnet.

3.2.1 Außenklima und Raumklima im Flur

Außenklima

Für die Einschätzung der Raumklimadaten und Leistungsmessung ist das Außenklima erforderlich. Zur Überprüfung der lokalen Klimaverhältnisse wurde zu der Außenklimamessung am Kloster an der Wand im 2. Obergeschoss im Bereich der gemessene Räume die Außenklimamessung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am Standort Aldersbach in dem Graphen in Bild 32 mit eingezeichnet.

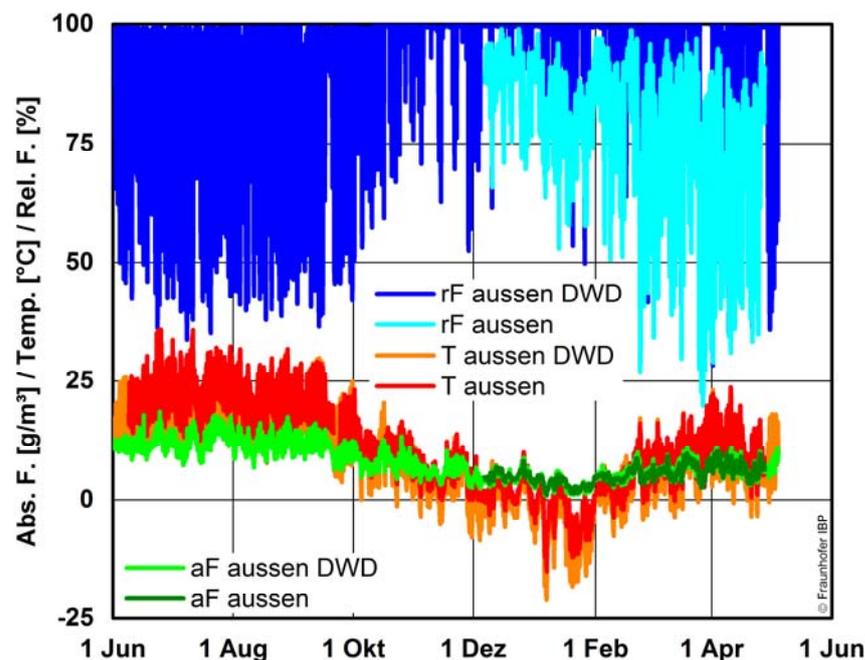


Bild 32:
Außenklima am Kloster an der Außenwand im 2. Obergeschoss im Vergleich zur Außenklimamessung des DWD am Standort Aldersbach mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 1.6.2016 bis 01.05.2017.

Die lokale Klimamessung am Kloster ist durch das Gebäude sowie durch das Messfühlergehäuse beeinflusst. Die Schwankungen der Temperatur fallen deutlich geringer aus. Zudem werden im Tagesgang, insbesondere im Winter, nicht so tiefe Temperaturen gemessen. Das Niveau der absoluten Feuchte stimmt im Wesentlichen überein, lediglich die Schwankungen im Tagesgang sind geringer.

Flur 2. Obergeschoss

In Bild 33 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt während der Heizperiode stark ab. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte um 10 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und verbleibt auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zum Vorjahr.

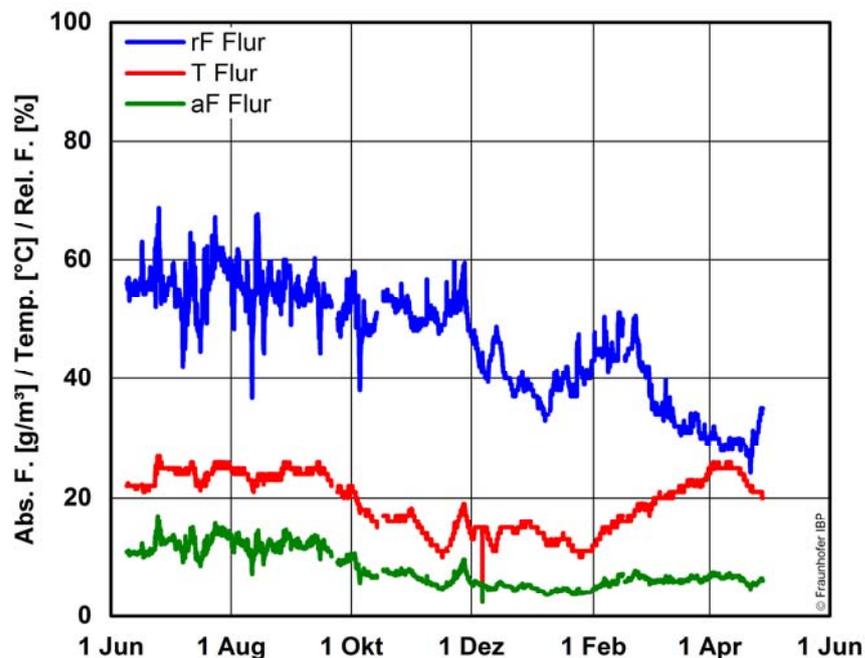


Bild 33:
Raumklima im Flur im 2. Obergeschoss (Messposition 2) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

3.2.2 Übersicht Raumklima in den Zimmern 2.26 bis 2.31

In den nachfolgenden Diagrammen ist jeweils eine Übersicht zu den Raumklimamessung für den gesamten Messzeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet.

Messungen Zimmer 2.26

In Bild 34 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt während der Heizperiode etwas ab. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 13 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt im Frühjahr wieder an. Insgesamt verbleibt das Niveau jedoch auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zum Vorjahr.

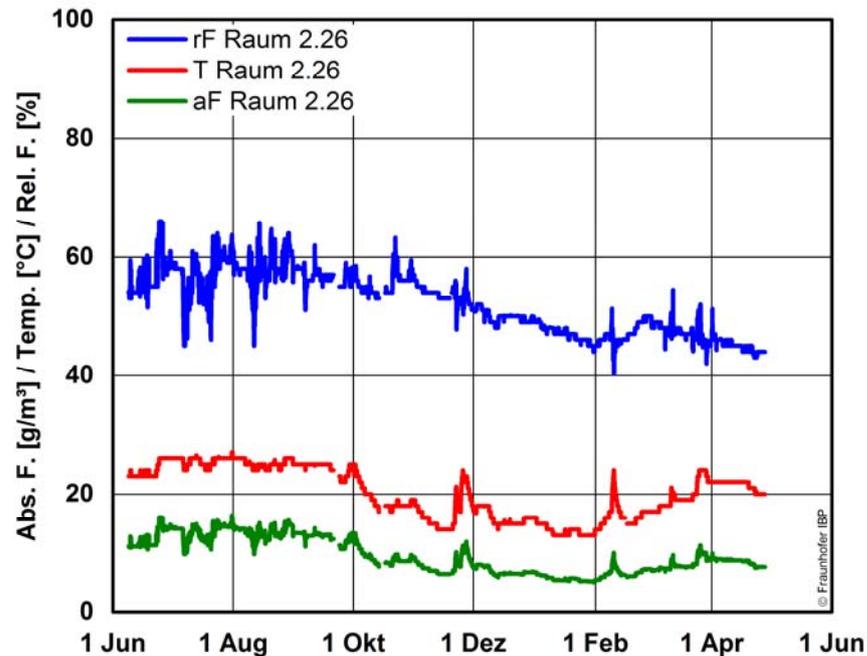


Bild 34:
Raumklima im Raum 2.26 (Messposition 3) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

Messungen Zimmer 2.27

In Bild 35 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt während der Heizperiode deutlich ab. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 12 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt im Frühjahr wieder an. Insgesamt verbleibt das Niveau jedoch auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zum Vorjahr.

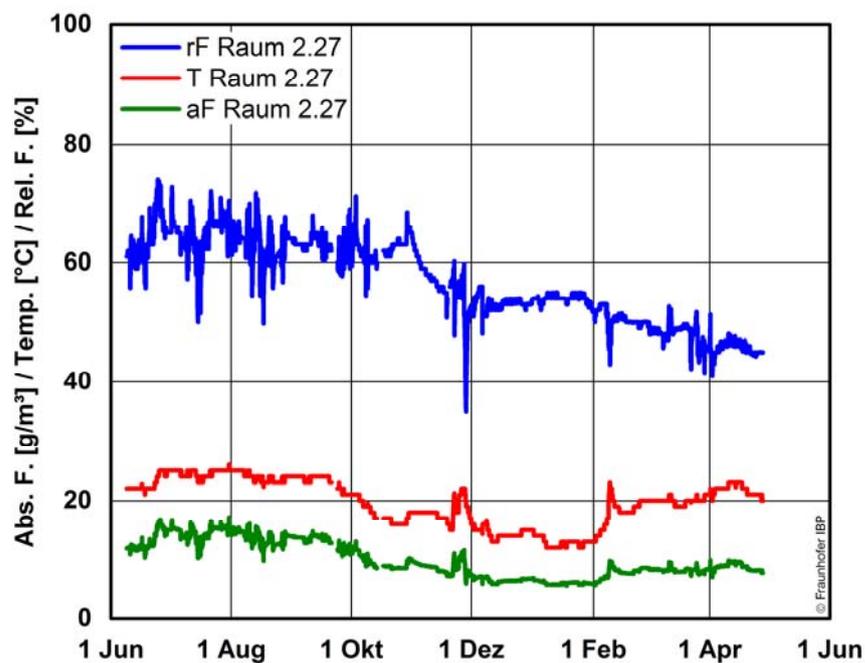


Bild 35:
Raumklima im Raum 2.27 (Messposition 5) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

Messungen Zimmer 2.28

In Bild 36 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt auch hier während der Heizperiode deutlich ab. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 13 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt im Frühjahr wieder an. Insgesamt verbleibt das Niveau jedoch auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zum Vorjahr.

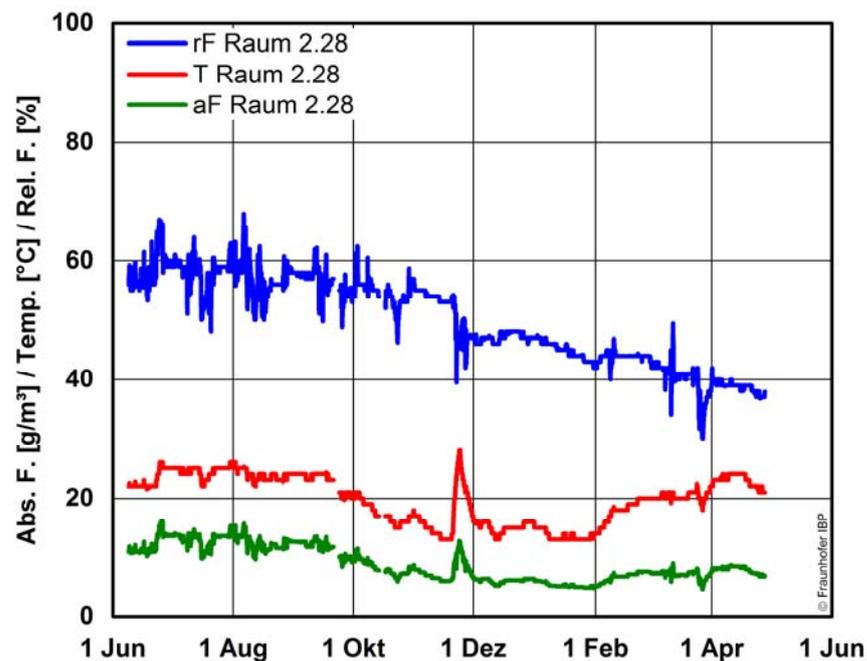


Bild 36:
Raumklima im Raum 2.28 (Messposition 9) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

Messungen Zimmer 2.29

In Bild 37 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt während der Heizperiode etwas ab. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 12 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt im Frühjahr wieder an. Insgesamt verbleibt das Niveau jedoch auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zum Vorjahr.

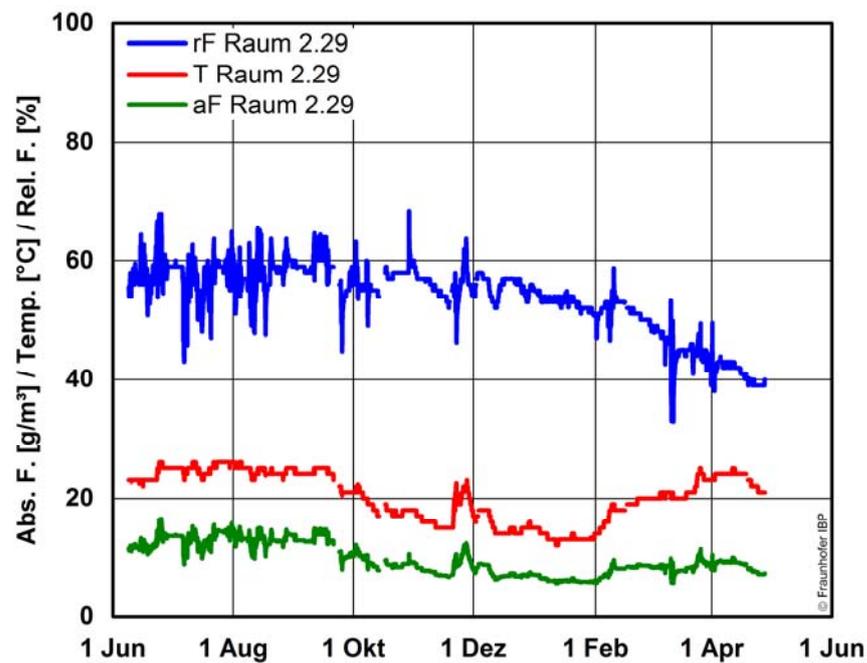


Bild 37:
Raumklima im Raum 2.28 (Messposition 11) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

Messungen Zimmer 2.30

In Bild 38 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt zu Beginn der Heizperiode etwas ab, um dann abrupt anzusteigen. Nach ca. 3 Wochen sinkt die relative Feuchte stark ab. Nach Angaben des Bauherrn ist die Ursache ein Wasserschaden über dem Raum, der offensichtlich zunächst einen Anstieg der relativen Feuchte bewirkte. Mit Trocknungsmaßnahmen wurde dem Raum wieder Feuchte entzogen, was zu der geringen relativen Feuchte führte. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 11 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt mit eintretendem Wasserschaden etwas an. Durch die eingeleitete Trocknungsmaßnahme verringert sich die absolute Feuchte wieder. Insgesamt verbleibt das Niveau der absoluten Feuchte auf deutlich niedrigeren Werten im Vergleich zum Vorjahr.

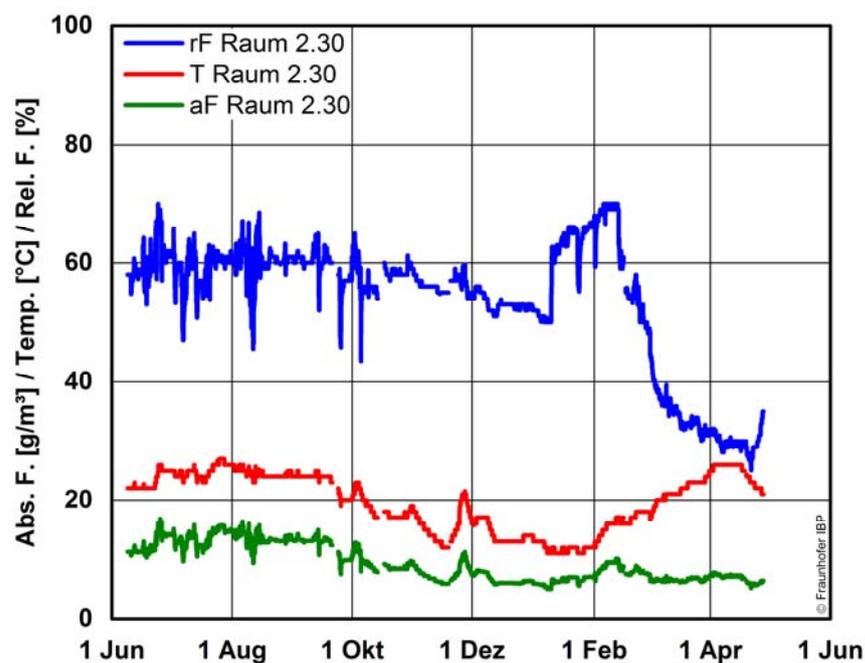


Bild 38:
Raumklima im Raum 2.30 (Messposition 13) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

Messungen Zimmer 2.31

In Bild 39 ist das erfasste Raumklima für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017 abgebildet. Die relative Feuchte sinkt zu Beginn der Heizperiode etwas ab, um dann abrupt anzusteigen. Auch in diesem Raum zeigen sich die Auswirkungen des Wasserschadens entsprechend dem angrenzenden Raum 2.30. Die Raumtemperatur sinkt ebenfalls in der kalten Jahreszeit deutlich unter 20 °C ab und erreicht minimale Werte bis 11 °C. Mit zunehmender wärmerer Witterung stellen sich höhere Raumtemperaturen ein. Das hohe Anfangsniveau der absoluten Feuchte sinkt ebenfalls entsprechend dem Jahresverlauf ab und steigt mit eintretendem Wasserschaden etwas an. Durch die eingeleitete Trocknungsmaßnahme verringert sich die absolute Feuchte wieder. Insgesamt verbleibt das Niveau der absoluten Feuchte auf deutlich niedrigeren Werten im Vergleich zum Vorjahr.

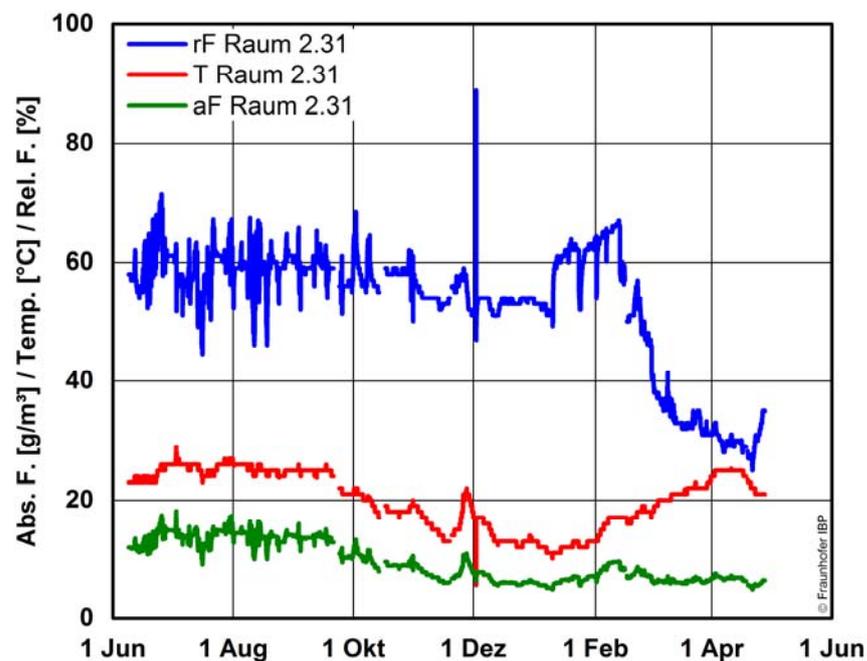


Bild 39:
Raumklima im Raum 2.31 (Messposition 17) mit relativer Feuchte, Temperatur und berechneter absoluter Feuchte mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017.

3.2.3 Vergleich der Raumklimata in den Räumen untereinander

Vergleich der relativen Feuchte

Bild 40 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte in den Räumen 2.26 bis 2.28 für den Messzeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist die Vergleichsmessung im Raum 2.27 mit einem unabhängig zum Messnetz aufgestelltem Stand-Alone Datenlogger für den Zeitraum vom 24.1. bis 26.4.2017 mit eingetragen (rF Raum 2.27 DL). Der Verlauf der relativen Feuchte ist in allen Räumen ähnlich. Im Raum 2.27 ist das Niveau der relativen Feuchte im Vergleich zu den anderen Räumen im Mittel um ca. 5 % r.F. etwas höher. Die Vergleichsmessung mit dem Datenlogger ist um ca. 5 % r.F. höher im Vergleich zur Messung, die an das Messnetz angeschlossen ist. Der Datenlogger wurde in unmittelbarer Nähe zum Sensor des Messnetzes aufgestellt.

In Bild 41 sind die Verläufe der relativen Feuchte in den Räumen 2.29 bis 2.31 abgebildet sowie die Vergleichsmessung mit einem Datenlogger in Raum 2.30. Die Verläufe der relativen Feuchte sind bis zum eintretenden Wasserschaden sehr ähnlich. In den Räumen 2.30 und 2.31 steigt mit dem Wasserschaden die relative Feuchte sprunghaft an und fällt dann mit Behebung der Ursache und anschließender Trocknung stark ab. Die Messwerte des Datenloggers zeigen einen ähnlichen Verlauf. Während des Wasserschadens wird jedoch eine um rund 8 % r.F. höhere relative Feuchte gemessen, danach ist die Abweichung mit rund 4 % höhere relative Feuchte im Mittel geringer.

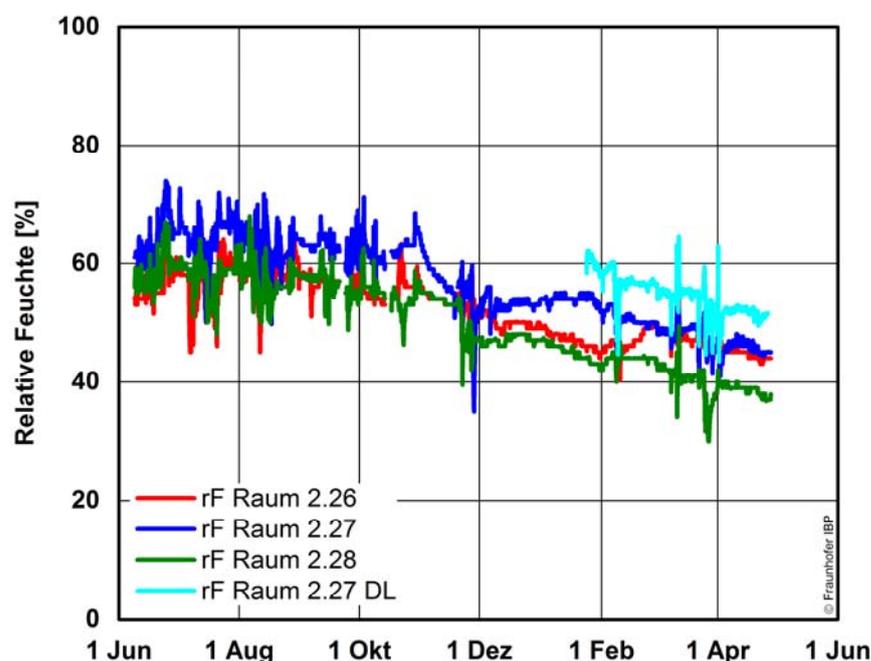


Bild 40:
Relative Feuchten der Räume 2.26 bis 2.28 (Messpositionen 3, 5 und 9) mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist eine Vergleichsmessung im Raum 2.27 für den Zeitraum vom 24.1. bis 26.4.2017 eingezeichnet.

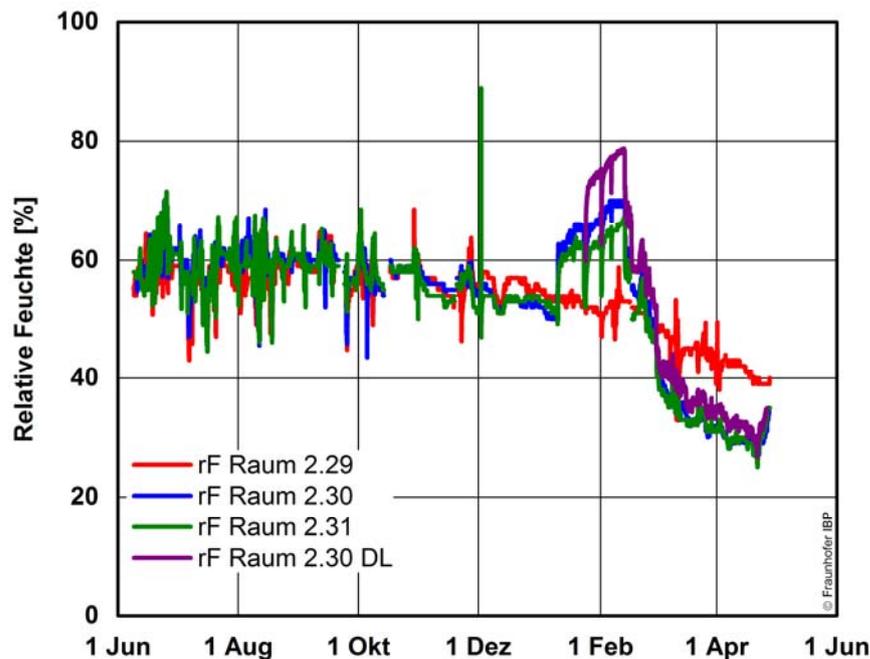


Bild 41:

Relative Feuchten der Räume 2.29 bis 2.31 (Messpositionen 11, 13 und 17) mit stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 9.6.2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist eine Vergleichsmessung im Raum 2.30 für den Zeitraum vom 24.1. bis 26.4.2017 eingezeichnet.

Vergleich der absoluten Feuchte

Im Diagramm in Bild 42 sind die Verläufe der absolute Feuchte in den Räumen 2.26 bis 2.28 sowie Flur und Außenklima des DWD mit dem gleitenden Monatsmittelwert der Messwerte (30 Tage) für den Zeitraum vom 24.6.2016 bis 12.04.2017 dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf der absoluten Feuchte der lokalen Außenklimamessung für den Zeitraum vom 22.12.2016 bis 12.04.2017 abgebildet. Im Flur entspricht die absolute Feuchte in etwa der der Außenluft. Lediglich in den Wintermonaten liegt die absolute Feuchte im Flur etwas höher im Vergleich zur absoluten Feuchte außen. Im Raum 2.28 entspricht die absolute Feuchte in den Sommermonaten zunächst dem Niveau der absoluten Feuchte der Außenluft. Ab November sinkt der absolute Feuchtegehalt gegenüber dem der Außenluft wesentlich langsamer, so dass sich während der Wintermonate ein um ca. 2 g/m^3 höherer Wassergehalt im gleitenden Monatsmittel einstellt. Im Frühjahr gleicht sich das Niveau der absoluten Feuchte im Raum 2.28 dem der Außenluft wieder an. In den Räumen 2.26 und 2.27 ist das Niveau der absoluten ganzjährig um ca. $1 \text{ bis } 3 \text{ g/m}^3$ höher im Vergleich zum absoluten Wassergehalt der Außenluft. Bild 43 zeigt den Verlauf der absoluten Feuchte für die Räume 2.29 bis 2.31 sowie Flur und Außenklima im gleitenden Monatsmittel (30 Tage). Die absoluten Feuchten in den Räumen 2.29 bis 2.31 sind um ca. $1 \text{ bis } 3 \text{ g/m}^3$ höher im Vergleich zur absoluten Feuchte der Außenluft. Mit eintretendem Wasserschaden erhöht sich die absolute Feuchte nochmal deutlich, um dann mit der technischen Trocknung auf das Niveau der absoluten Feuchte der Außenluft abzusinken.

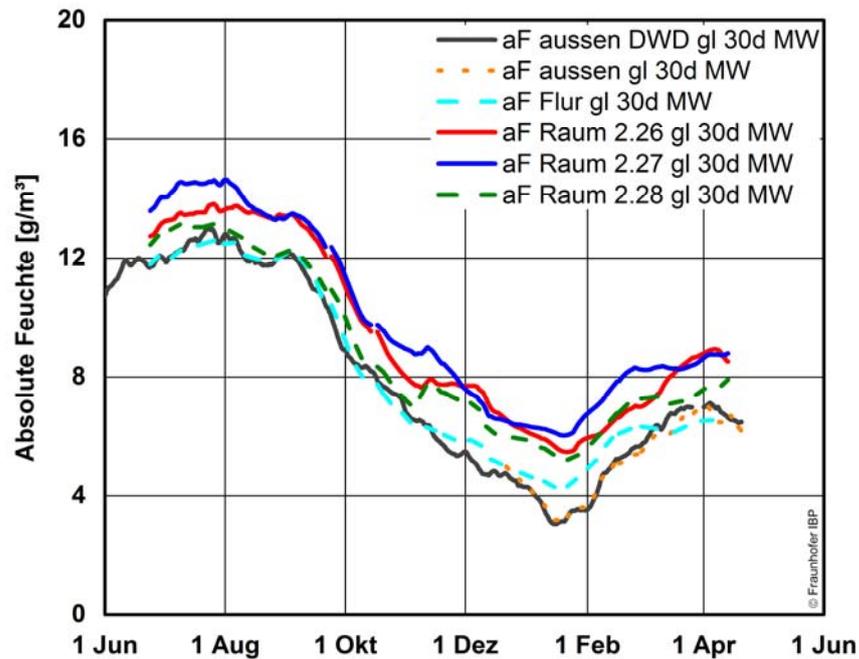


Bild 42:
 Absolute Feuchten der Räume 2.26 bis 2.28 sowie Flur und Außenklima im gleitenden Monatsmittel (30 Tage) vom 9.6.2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist der Verlauf der absoluten Feuchte der lokalen Außenklimamessung vom 22.12.2016 bis 12.04.2017 abgebildet.

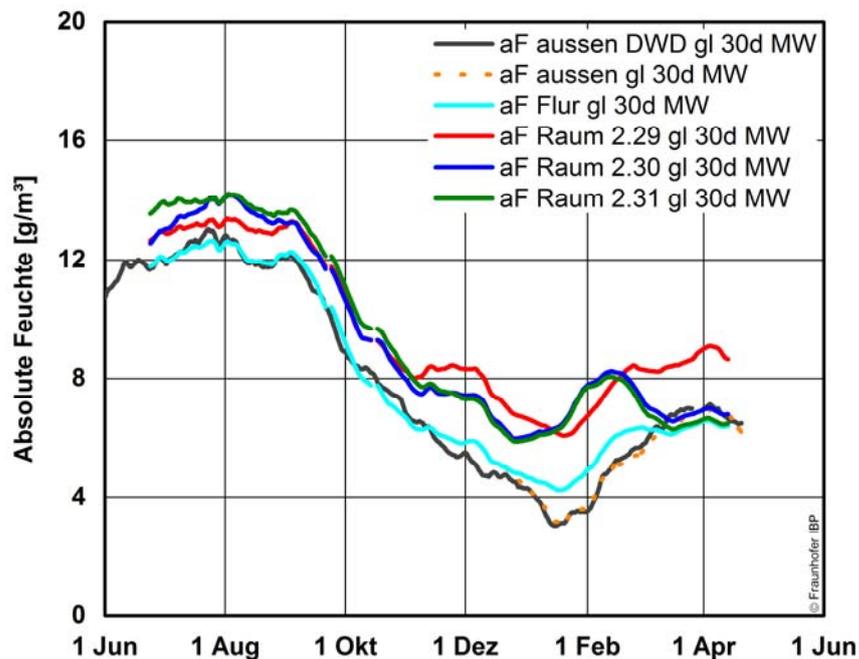


Bild 43:
 Absolute Feuchten der Räume 2.29 bis 2.31 sowie Flur und Außenklima im gleitenden Monatsmittel (30 Tage) vom 9.6.2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist der Verlauf der absoluten Feuchte der lokalen Außenklimamessung vom 22.12.2016 bis 12.04.2017 abgebildet.

Vergleich der Raumtemperatur

Der Vergleich der Raumtemperatur wird für den Zeitraum der Darstellung der Leistungsmessung und Temperaturmessung in der Wand vom 1.12.2016 bis 27.04.2017 in den Diagrammen in Bild 44 bis Bild 46 dargestellt.

In Bild 44 sind die Temperaturverläufe der Räume 2.26 bis 2.28, Flur und Außenklima abgebildet. Die Temperaturen weichen zwischen den Räumen um ca. 1 bis 2 °C voneinander ab. Die Vergleichsmessung mit einem Datenlogger weicht im Raum 2.27 zu den Messwerten des Messnetzes um ca. 2 °C ab. Die Raumtemperaturen folgen dem saisonalen Verlauf des Außenklimas mit einem Temperaturabstand von ca. 10 bis 12 °C zum gleitenden Monatsmittel. Die sehr tiefen Außentemperaturen im Januar von bis zu -20 °C wirken sich nicht kurzfristig unmittelbar auf die Raumtemperatur aus. Die kurzfristige Temperaturerhöhung Anfang Februar im Raum 2.26 und 2.27 wird auf eine zusätzliche in Betrieb genommene Heizeinrichtung zurückgeführt. Die Temperaturverläufe in den Räumen 2.29 bis 2.31 sind in Bild 45 dargestellt. Die Temperaturverläufe sind in den Räumen ähnlich, mit geringen Abweichungen. Die Vergleichsmessung mit einem unabhängigen Datenlogger zeigt auch hier eine Abweichung von ca. 1 bis 2 °C zu den Messwerten des Messnetzes.

Für die Abschätzung der Vergleichbarkeit der Leistungsmessung der Räume 2.26 bis 2.28 mit gedämmter Temperierung und Räume 2.29 bis 2.31 mit Temperierung ohne zusätzlicher Dämmung wurde aus den jeweiligen Raumtemperaturen ein Mittelwert der Raumgruppen gebildet. In Bild 46 ist der Mittelwert der Raumtemperaturen der Raumgruppe 2.26 bis 2.28 und der Raumgruppe 2.29 bis 2.31 abgebildet. Die gemittelten Raumtemperaturen mit gedämmter Temperierung (Räume 2.26 bis 2.28) sind zunächst etwas höher im Vergleich zu der mittleren Raumtemperatur der Raumgruppe 2.29 bis 2.31, um dann annähernd gleich zu verlaufen. Im Frühjahr kehren sich die Verhältnisse um und die gemittelten Raumtemperaturen der Raumgruppe 2.26 bis 2.28 sind in etwa 1 bis 2 °C niedriger, als die gemittelten Raumtemperaturen der Raumgruppe 2.29 bis 2.31.

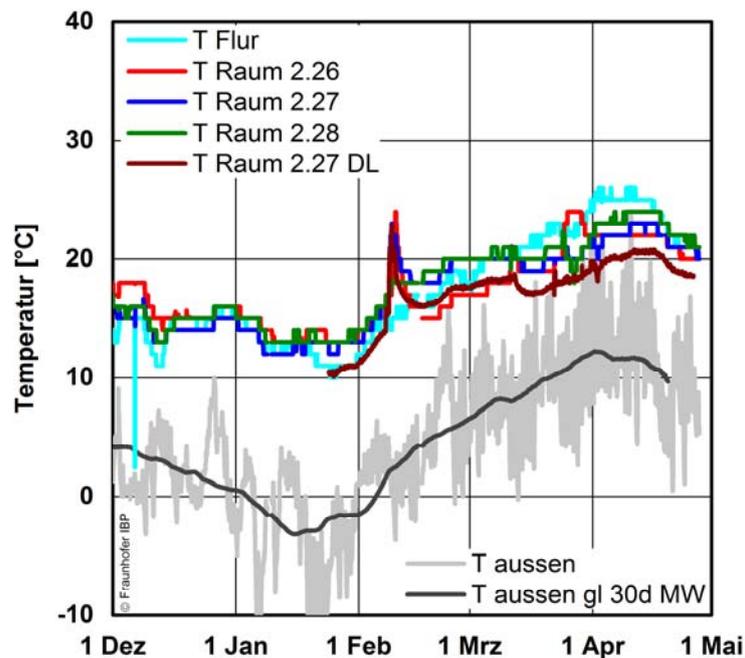


Bild 44:
 Temperaturverläufe in den Räumen 2.26 bis 2.28 sowie Flur und Außenklima mit den stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 1.12. 2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist die Außentemperatur mit dem gleitenden Monatsmittel (30 Tage) eingezeichnet, sowie die Vergleichsmessung mit Datenlogger (DL) im Raum 2.27 mit stündlichem Mittelwert.

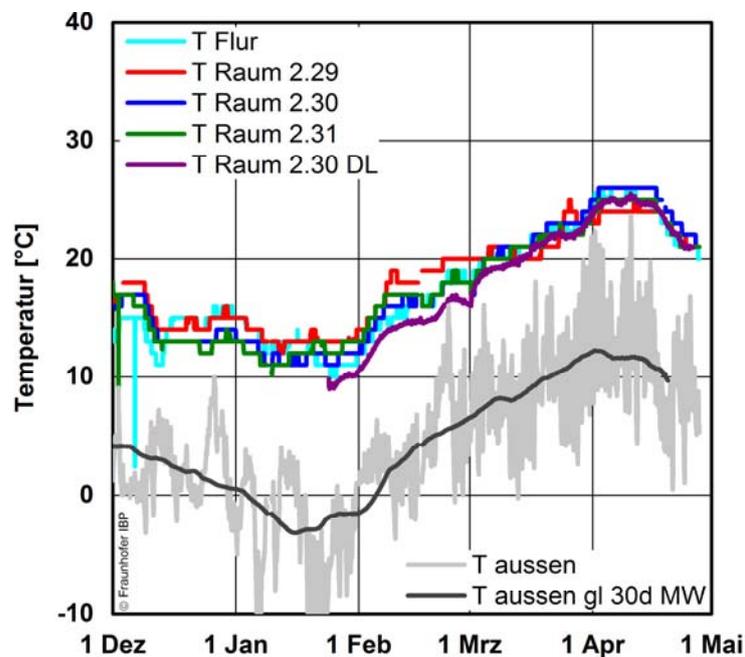


Bild 45:
 Temperaturverläufe in den Räumen 2.29 bis 2.31 sowie Flur und Außenklima mit den stündlichen Mittelwerten für den Zeitraum vom 1.12. 2016 bis 27.04.2017. Zusätzlich ist die Außentemperatur mit dem gleitenden Monatsmittel (30 Tage) eingezeichnet, sowie die Vergleichsmessung mit Datenlogger (DL) im Raum 2.30 mit stündlichem Mittelwert.

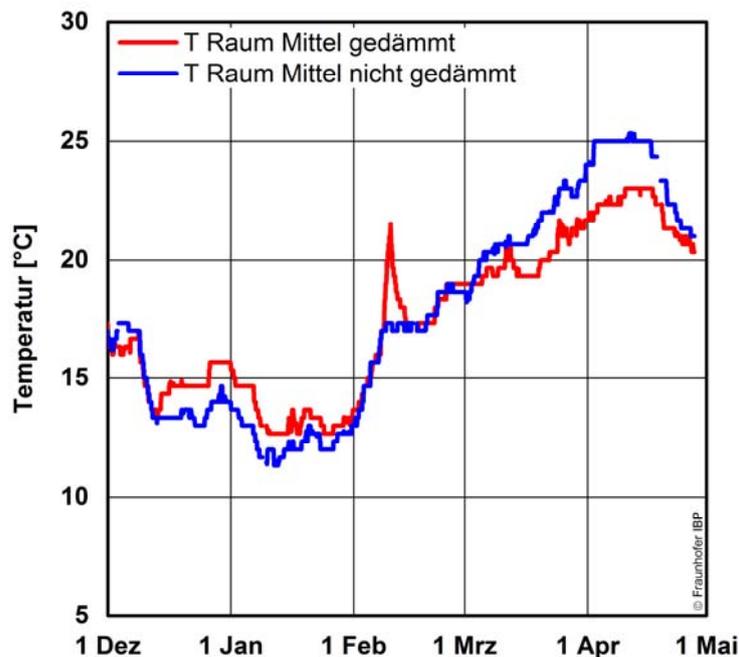


Bild 46:
Mittlere Raumtemperaturen der Raumgruppen 2.26 bis 2.28 und 2.29 bis 2.31 für den Zeitraum vom 1.12. 2016 bis 27.04.2017.

3.2.4 Messung Temperatur Wandoberfläche bei Laibungsschleife

Zur Feststellung der Heiztätigkeit der hinzuschaltbaren Heizschleife in der Fensterlaibung wurde an jeder Laibungsschleife ein Temperatursensor an der Wandoberfläche direkt über der hinzuschaltbaren Heizleitung montiert. Die Regelung erfolgt über einen Raumthermostat, das je nach Einstellung die zusätzliche Laibungsschleife durch Öffnen des Ventils aktiviert oder durch Schließen des Ventils abschaltet. In den Diagrammen Bild 47 bis Bild 51 sind die jeweiligen Temperaturverläufe für die Räume 2.26 bis 2.31 mit der jeweiligen Raumtemperatur abgebildet (Messposition 4, 6 und 10).

In Bild 52 sind die Wandoberflächentemperaturen direkt über dem Heizrohr der Laibungsschleife für die Räume 2.29 bis 2.31 mit gedämmter Temperierung zusammengefasst dargestellt (Messposition 12, 14 und 18). Zusätzlich ist die mittlere Raumtemperatur der Raumgruppe mit eingezeichnet. In Bild 53 erfolgt eine analoge Darstellung für die Raumgruppe ohne Dämmung hinter der Heizleitung (Räume 2.29 bis 2.31). Die Vergleiche zeigen, dass die Heiztätigkeit nicht einheitlich reagiert. Für die weitere Auswertung der Wärmeabgabe werden deshalb Zeiträume mit gleichem Heizverhalten ausgewählt und gegenübergestellt.

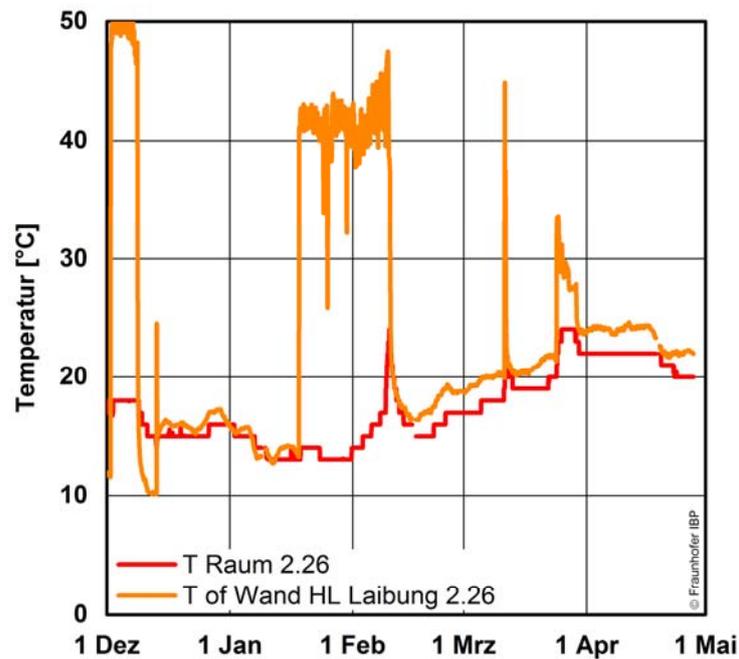


Bild 47:
Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.26 (Messposition 4) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

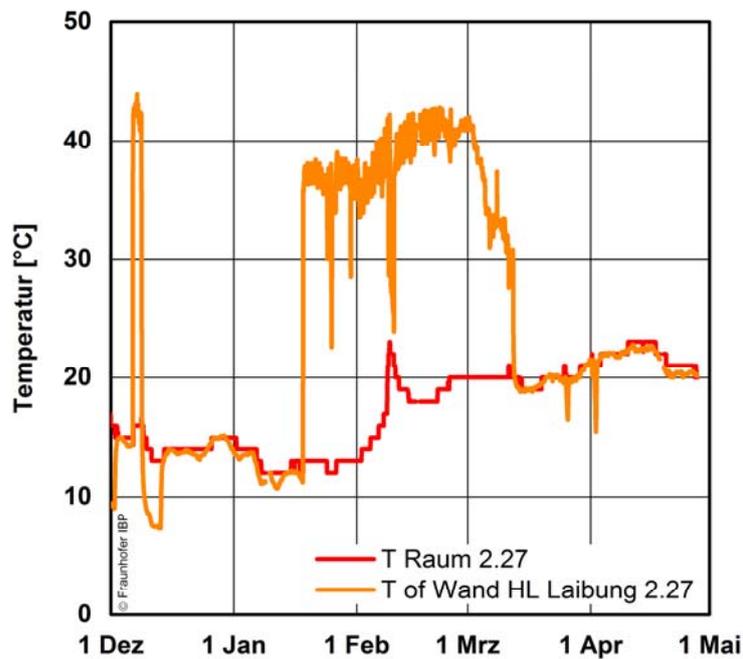
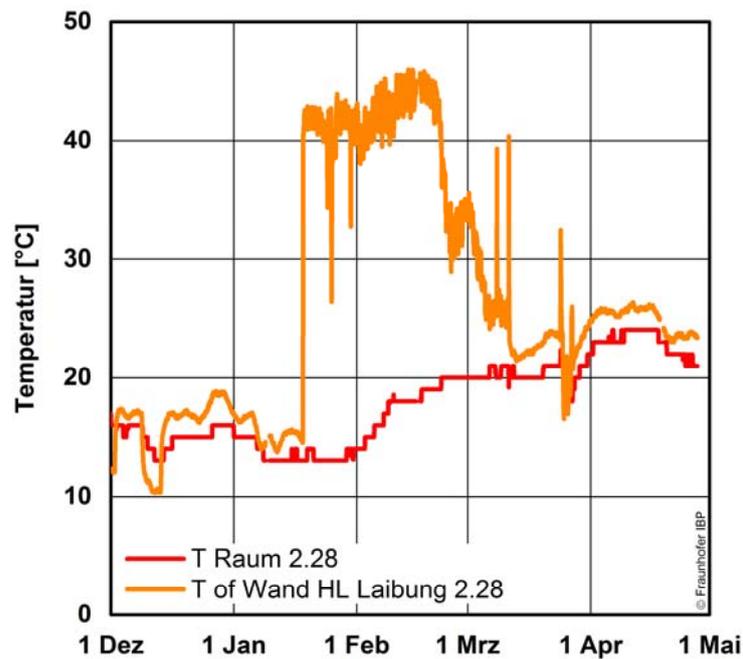


Bild 48:
Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.27 (Messposition 6) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.



Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.28 (Messposition 10) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

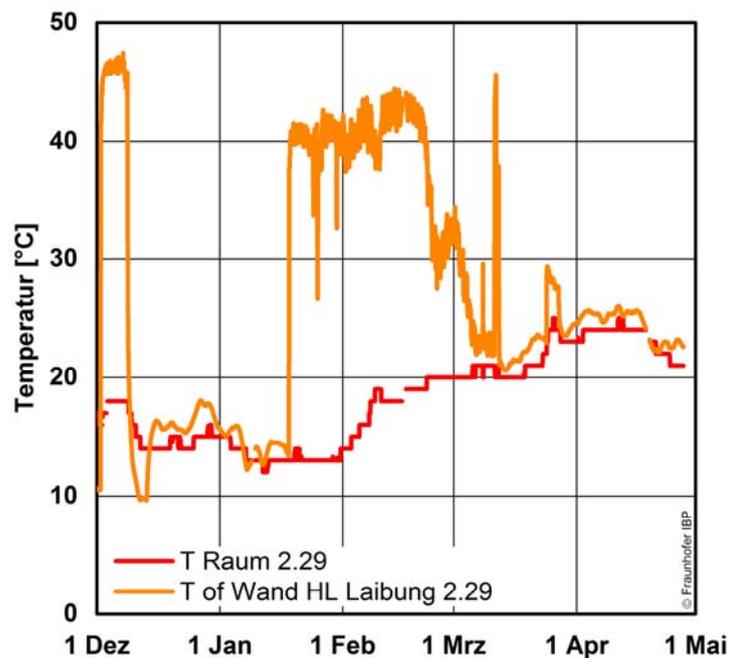


Bild 49: Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.29 (Messposition 12) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

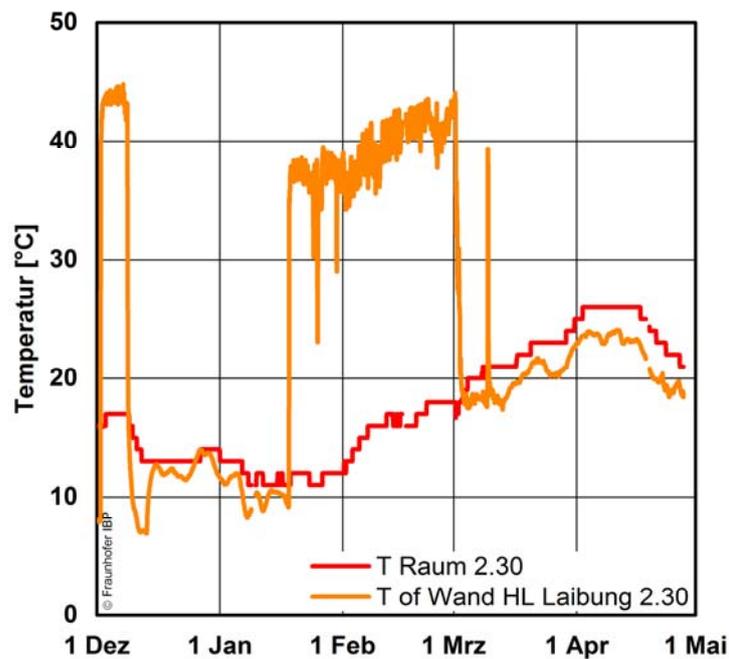


Bild 50:
Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.30 (Messposition 14) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

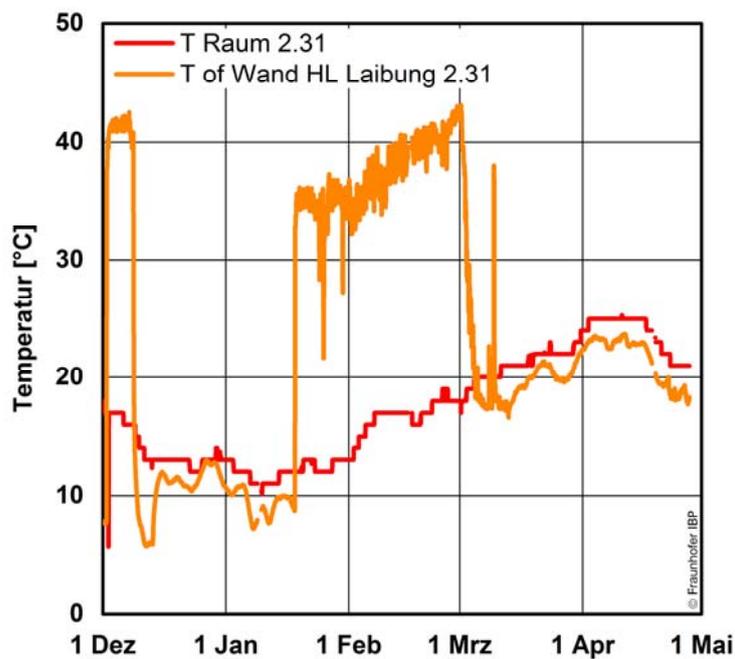


Bild 51:
Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife sowie die Raumtemperatur im Raum 2.31 (Messposition 18) vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

Vergleich der Heztätigkeit der Laibungsschleifen

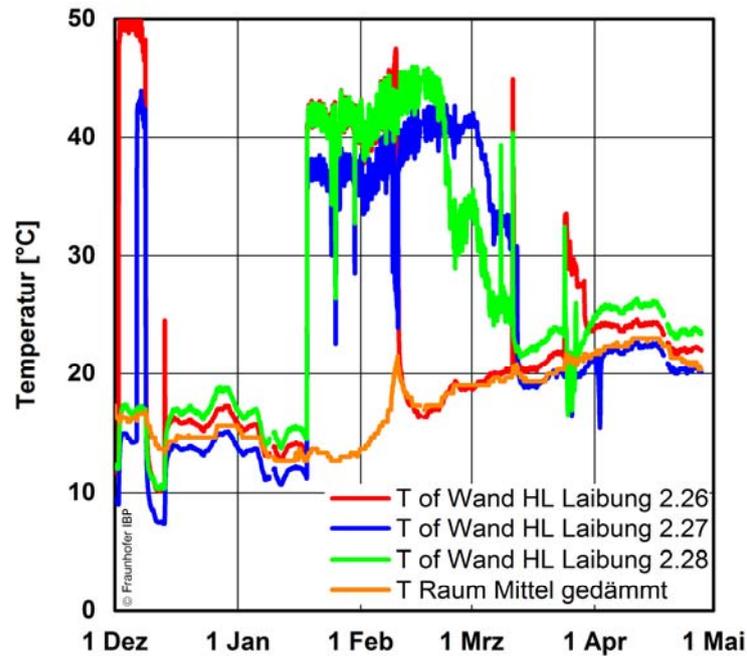


Bild 52: Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife für die Räume 2.26 bis 2.28 (Messposition 4, 6 und 10) sowie die mittlere Raumtemperatur vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

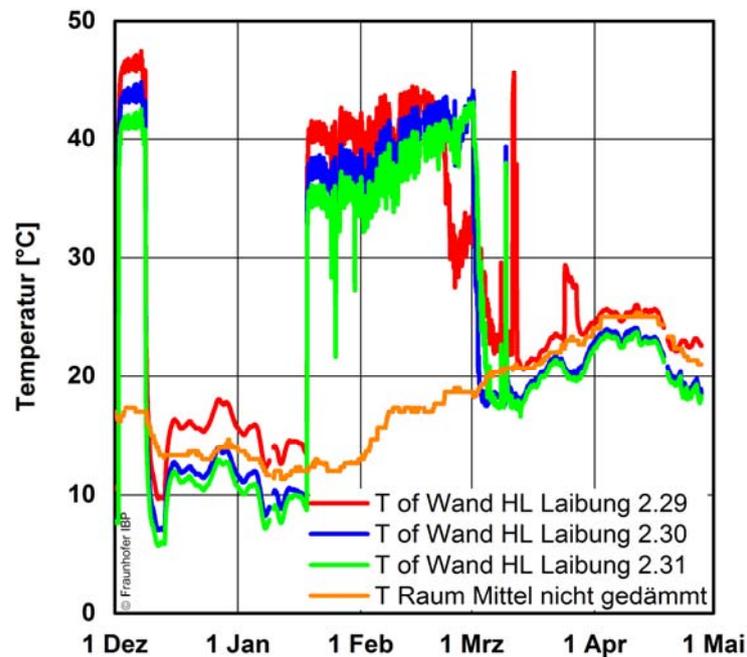


Bild 53: Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung der Laibungsschleife für die Räume 2.29 bis 2.31 (Messposition 12, 14 und 18) sowie die mittlere Raumtemperatur vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

3.2.5 Vergleich Wandoberflächentemperatur und Wandtemperatur hinter der Sockelschleife

In den Räumen 2.27 und 2.30 wird zusätzlich die Auswirkung der Temperierung mit Wärmedämmung hinter der Heizleitung und Temperierung ohne Wärmedämmung mit einer Temperaturmessung dokumentiert. Hierzu wurde im Bereich der Sockelschleife direkt über der Heizleitung auf der Wandoberfläche ein Temperatursensor in den Räumen 2.27 und 2.30 montiert. Im Raum 2.27 wurde zusätzlich ein Temperatursensor direkt hinter der Wärmedämmung angeordnet. Im Raum 2.30 wurde keine Wärmedämmung eingebaut. Zum Vergleich der Auswirkung wird jedoch in der gleichen Mauertiefe wie mit Wärmedämmung die Temperatur im Mauerwerk aufgezeichnet. In Bild 54 sind die Temperaturverläufe der Vorlauftemperatur (Messposition 19), Wandoberflächentemperatur (Messposition 7) und hinter der Dämmung (Messposition 8) dargestellt. In dem Zeitraum Mitte Dezember bis Anfang Januar stellt sich bei einer Vorlauftemperatur von ca. 60 °C und einer Raumtemperatur von ca. 14 °C an der Wandoberfläche eine Oberflächentemperatur von ca. 30 °C ein. Hinter der Wärmedämmung werden ca. 23 °C erreicht. Im Vergleich hierzu wird ohne Wärmedämmung in der gleichen Schichttiefe eine Wandtemperatur von ca. 29 °C bei in etwa gleichen Randbedingungen erreicht, siehe Bild 55. Die Wärmedämmung sorgt für einen deutlichen Temperaturabfall.

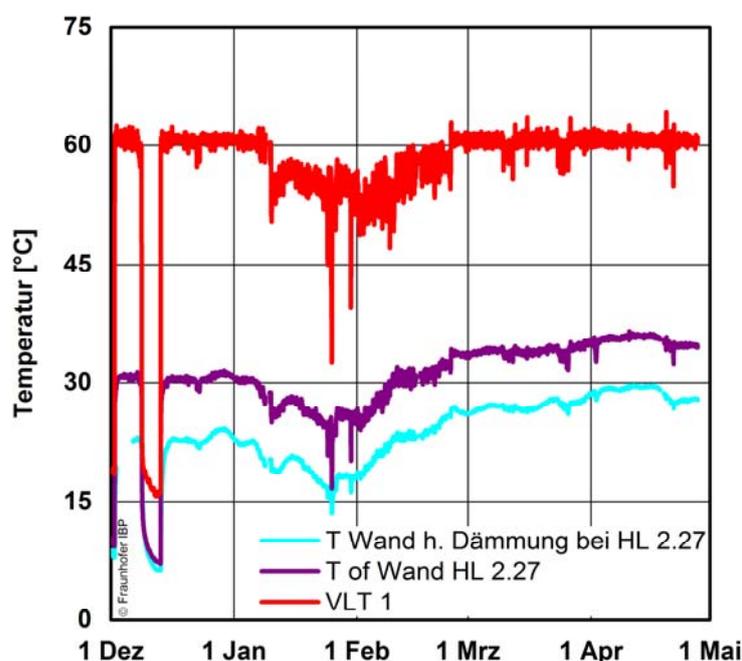


Bild 54:
Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung, Vorlauftemperatur und Schichttemperatur hinter der Wärmedämmung auf Höhe der Heizleitung im Raum 2.27 (Messposition 7, 8 und 19) im Zeitraum vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

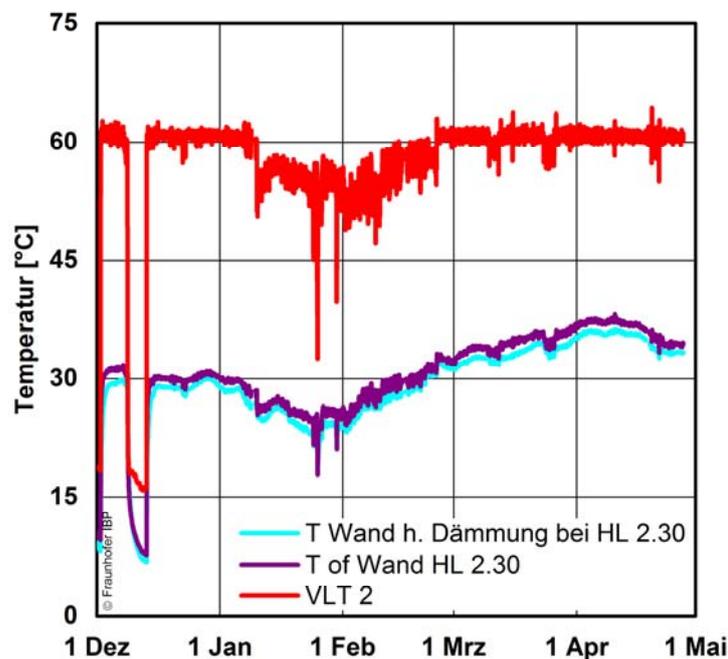


Bild 55:
Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung, Vorlauftemperatur und Schichttemperatur hinter der Heizleitung in gleicher Schichttiefe wie bei der gedämmten Ausführung auf Höhe der Heizleitung im Raum 2.230 (Messposition 15, 16 und 20) im Zeitraum vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

3.2.6 Messung Wärmeabgabe

Es wird die Wärmeabgabe von zwei Heizschleifen mit Wärmemengenzählern erfasst. Jede der zwei Heizschleifen ist in etwa gleich lang und erstreckt sich über jeweils drei einzelne Räume. Die Heizschleife mit Wärmedämmung direkt hinter der Heizleitung wird mit dem Wärmemengenzähler 1 gemessen, die konventionell eingebaute Heizschleife ohne Wärmedämmung wird mit dem Wärmemengenzähler 2 gemessen. Es werden zu der im Wärmemengenzähler bereits berechneten Wärmemenge die einzelnen Parameter der Wärmemengenmessung, d.h. Vor- und Rücklauftemperatur sowie die Durchflussmenge des Heizwassers gesondert ausgelesen, erfasst, ausgewertet und dargestellt. Die Wärmemenge berechnet sich aus der Temperaturdifferenz der Vor- und Rücklauftemperatur (Spreizung) und der Durchflussmenge des Heizwassers (Volumenstrom). Die Wärmeabgabe der Temperierung hängt hauptsächlich von der mittleren Übertemperatur des Heizmediums zur Raumtemperatur ab. Die mittlere Übertemperatur wird hier als Differenz des Mittelwertes der Vor- und Rücklauftemperatur von der Raumtemperatur beschrieben.

In Bild 56 und Bild 57 sind die Leistung (Wärmemenge), der Durchfluss (DF), die Spreizung (Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf) sowie die mittlere Übertemperatur ($T_{mü}$) der jeweiligen Temperierung für den Zeitraum vom 1.12.2016 bis 27.4.2017 abgebildet.

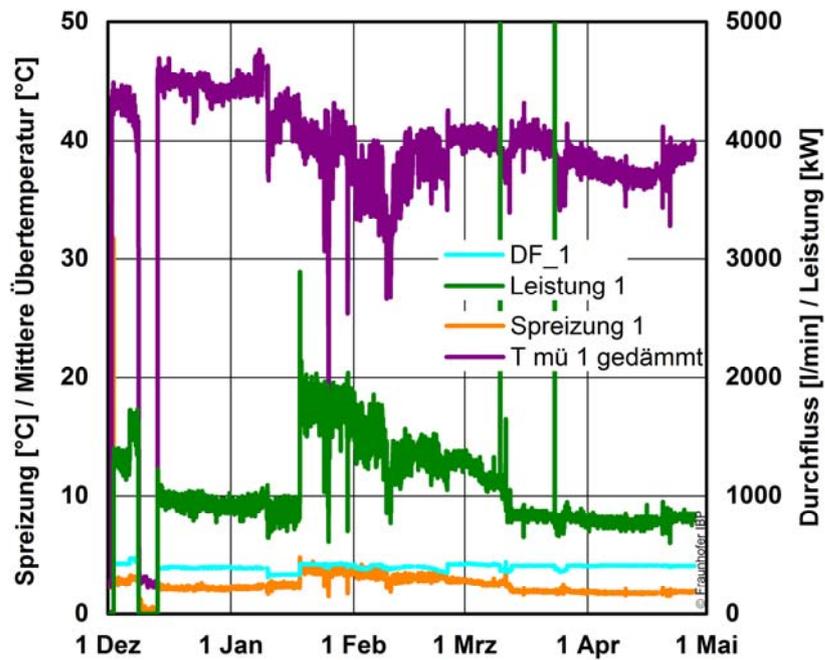


Bild 56:
Leistung (Wärmemenge), der Durchfluss (DF), die Spreizung sowie die mittlere Übertemperatur ($T_{mü}$) der Temperierschleife mit Wärmedämmung für den Zeitraum vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

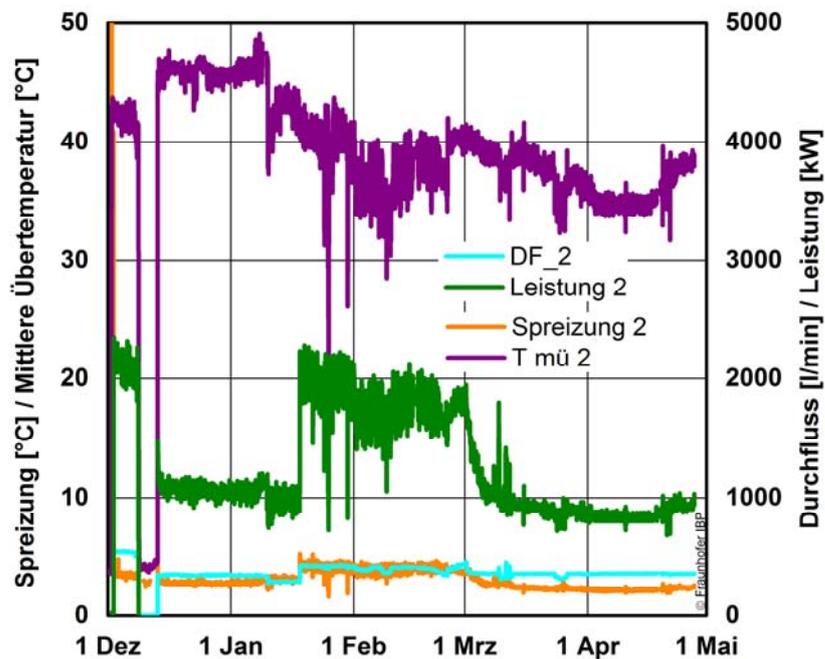


Bild 57:
Leistung (Wärmemenge), der Durchfluss (DF), die Spreizung sowie die mittlere Übertemperatur ($T_{mü}$) der konventionell eingebauten Temperierschleife (ohne Wärmedämmung) für den Zeitraum vom 1.12.2016 bis 27.4.2017.

Für den Vergleich der Wärmeabgabe der beiden Heizschleifen ist eine Messperiode erforderlich in der die zusätzlich aktivierbaren Laibungsschleifen zu einem gleichen Zeitpunkt abgeschaltet bzw. eingeschaltet sind. In Bild 58 und Bild 59 sind die Oberflächentemperaturen direkt über der jeweiligen Heizleitung der Laibungsschleife für die Räume 2.26 bis 2.28 bzw. 2.29 bis 2.31 vom 14.12.2016 bis 12.02.2017 abgebildet. Am 18.1.2017 werden bei allen Räumen die Laibungsschleifen aktiviert, die Oberflächentemperatur steigt sprunghaft an. Für den Vergleich der Wärmeabgabe der Sockelschleife wird der Zeitraum vom 14.12.2016 bis zum 18.01.2017 herangezogen. Für den Vergleich der Wärmeabgabe der Sockelschleife mit Laibungsschleife wird der Zeitraum vom 18.01. bis zum 10.2.2017 verwendet.

In Bild 60 und Bild 61 sind die Leistung, Spreizung, Durchflussmenge und mittlere Übertemperatur für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.02.2017 dargestellt. Zum Zeitpunkt der Aktivierung der Laibungsschleifen steigt die Wärmeabgabe sprunghaft auf in etwa den doppelten Wert an. Werden die stündlichen Mittelwerte der Wärmeabgabe aufsummiert, ergibt sich der kumulierte Verlauf, siehe Bild 62. Nach dem Aktivieren der Laibungsschleifen stellt sich ein steilerer Verlauf der beiden Graphen ein. Die Temperierschleife ohne Wärmedämmung gibt dabei mehr Wärme ab als die wärmedämmte Temperierschleife. Die Differenz der Wärmeabgabe zwischen den beiden Temperierschleifen bleibt über den zeitlichen Verlauf nahezu gleich hoch. In dem Diagramm in Bild 63 ist die eingesparte Energie im Verhältnis zur Wärmeabgabe der konventionell eingebauten Temperierung (ohne Wärmedämmung) im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die wärmedämmte Temperierung gibt demnach im Betrieb mit der Sockelschleife um ca. 12 % bis 15 % weniger Wärme (7-Tage Mittelwert) ab und im Betrieb mit der Sockel- und Laibungsschleife um ca. 10 % bis 13 % weniger Wärme (7-Tage Mittelwert) ab.

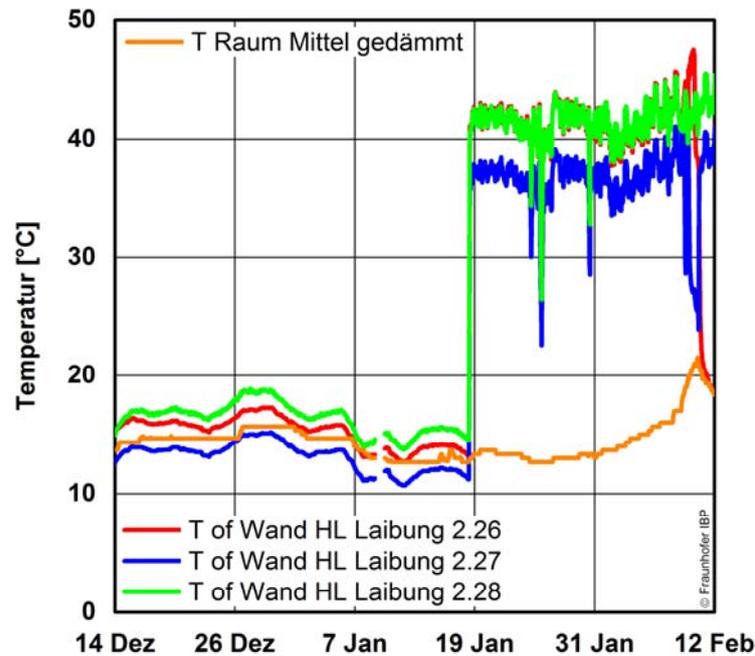


Bild 58:
Oberflächentemperaturen direkt über der jeweiligen Heizleitung der Laibungsschleife der Räume 2.26 bis 2.28 sowie die gemittelte Raumtemperatur der Räume im Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.02.2017.

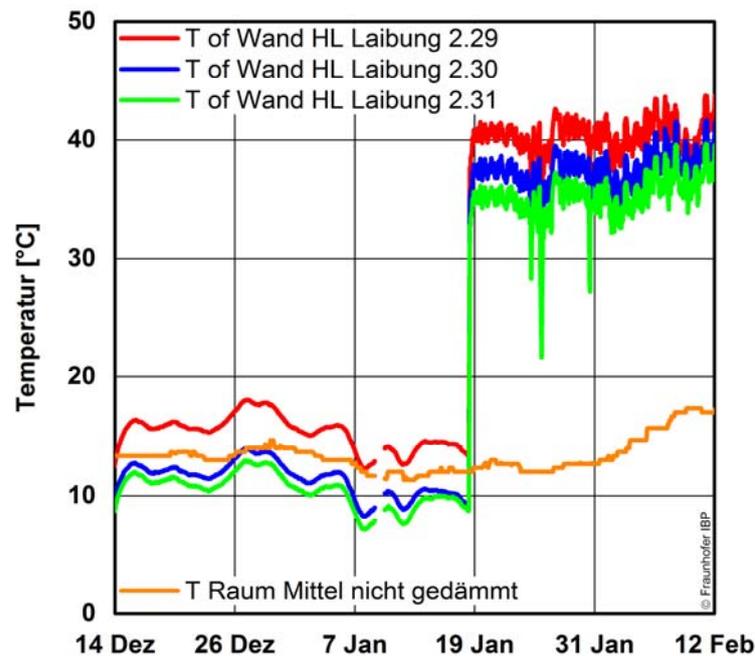


Bild 59:
Oberflächentemperaturen direkt über der jeweiligen Heizleitung der Laibungsschleife der Räume 2.29 bis 2.31 sowie die gemittelte Raumtemperatur der Räume im Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.02.2017.

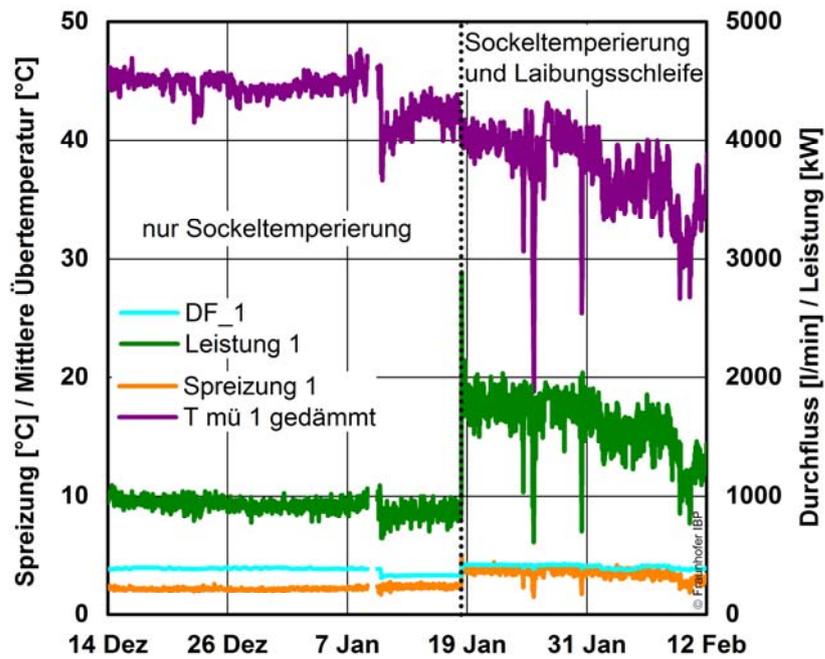


Bild 60:
Leistung (Wärmemenge), der Durchfluss (DF), die Spreizung sowie die mittlere Übertemperatur ($T_{mü}$) der Temperierschleife mit Wärmedämmung für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.4.2017.

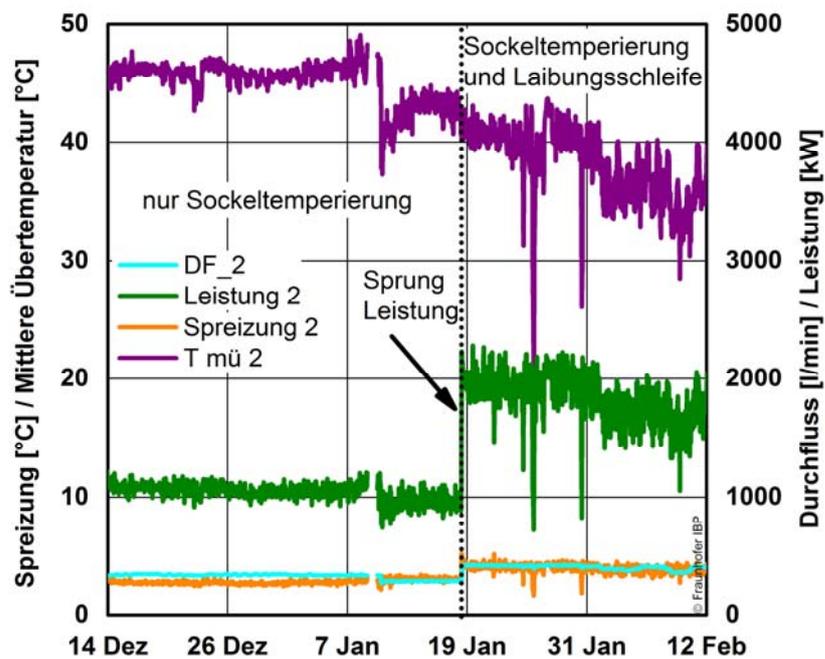


Bild 61:
Leistung (Wärmemenge), der Durchfluss (DF), die Spreizung sowie die mittlere Übertemperatur ($T_{mü}$) der konventionell eingebauten Temperierschleife (ohne Wärmedämmung) für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.4.2017.

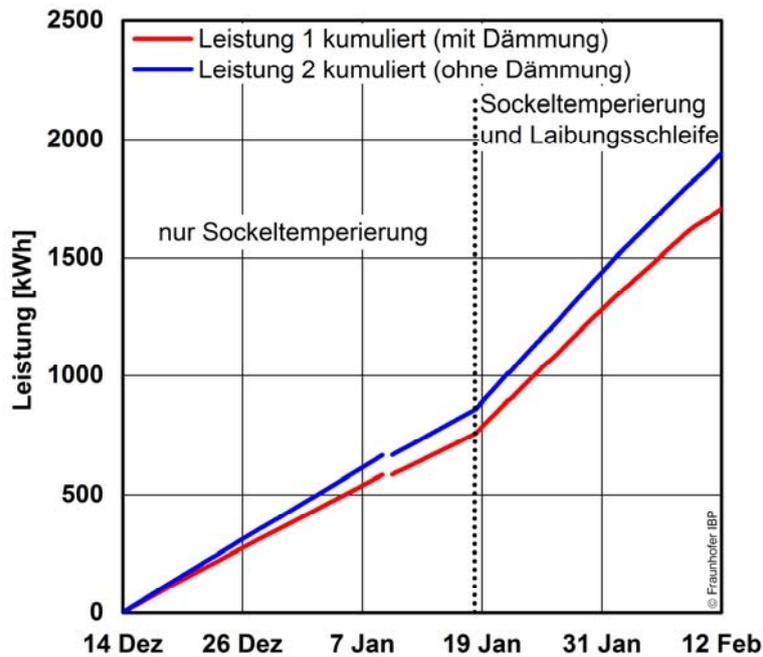


Bild 62:
Kumulierte Leistung der Temperierung mit Wärmedämmung (Leistung 1) und Temperierung ohne Wärmedämmung (Leistung 2) für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.2.2017.

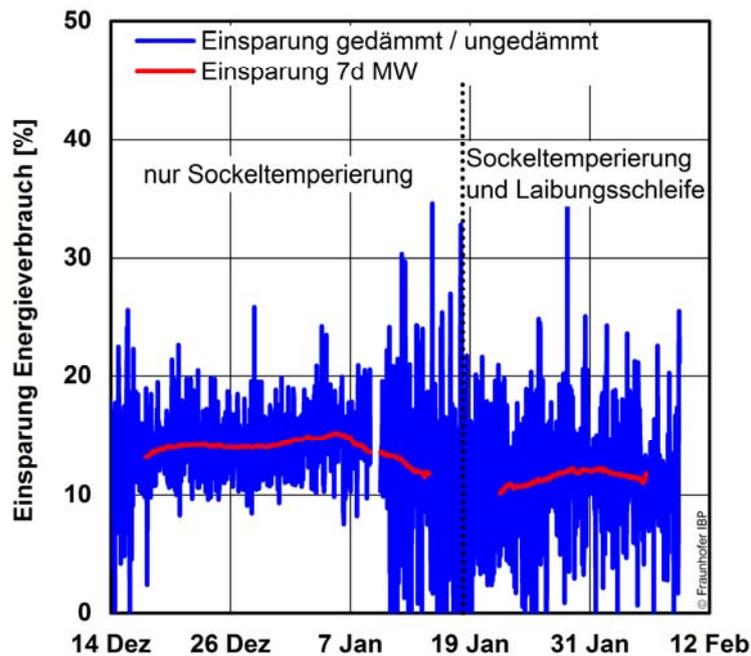


Bild 63:
Reduzierte Wärmeabgabe der gedämmten Temperierung im Verhältnis zur konventionellen Temperierung ohne Wärmedämmung als Einsparung in Prozent für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 10.2.2017.

Wärmeabgabe in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur

Die Wärmeabgabe von luftumspülten Heizflächen hängt ausschließlich von der Lufttemperatur und Temperatur der Heizfläche ab. Im Falle der Bauteiltemperierung ist das Heizrohr in die Außenwand mit eingebettet. Dadurch ergibt sich zusätzlich eine weitere Abhängigkeit von der Außentemperatur, die hier jedoch vernachlässigt wird. In den Diagrammen Bild 64 bis Bild 67 wird die Wärmeabgabe der Temperierung in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur dargestellt. Die mittlere Übertemperatur wird hier als Differenz des Mittelwertes der Vor- und Rücklauf Temperatur zur Raumtemperatur beschrieben.

Bild 64 zeigt das Streudiagramm der Wärmeabgabe der Temperierschleife mit Wärmedämmung für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockeltemperierung ohne Laibungsschleifen) und vom 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung mit Laibungsschleifen) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur. In Bild 65 ist die Wärmeabgabe der Temperierung ohne Wärmedämmung im Streudiagramm in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur für die zwei gewählten Zeitbereiche abgebildet.

Um die Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr zu erhalten, wird die Wärmeabgabe der Temperierung durch die Länge der Heizleitung geteilt. In der ersten Periode wird nur die Sockelschleife betrieben, es wird nur die Länge der Sockelschleife angesetzt. In der zweiten Periode wird die Gesamtlänge inklusive der Laibungsschleifen als Heizrohrlänge verwendet. In Bild 66 und Bild 67 sind jeweils die zwei Zeitbereiche für die Temperierung mit Wärmedämmung und ohne Wärmedämmung als Streudiagramm abgebildet. Es ergibt sich jeweils für die Sockeltemperierung eine geringere Wärmeabgabe bei gleicher mittlerer Übertemperatur. Dieser Effekt ist in der Verlegung der Heizleitung begründet. Während die Sockelschleife mit Vor- und Rücklaufleitung parallel in einem Abstand von ca. 16 cm verlegt sind ist die Laibungsschleife überwiegend als Einrohrschleife (ohne Beeinflussung einer zweiten Heizleitung) verlegt. Die parallele Verlegung im Sockel führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Wärmeströme. Im Ergebnis wird von der parallel verlegten Heizleitung bei beiden Varianten (mit und ohne Wärmedämmung) weniger Wärme pro Meter Heizrohr im Vergleich zur Einrohrleitung abgeben [17].

Bei einer mittleren Übertemperatur ergibt sich gemäß approximierter Funktion bei der Referenzmessung (Temperierung ohne Dämmung) eine Gesamtwärmeabgabe von 33 W/m, für die Sockelschleife 30 W/m Heizleitung und für die Laibungsschleife ca. 36 W/m. Mit Wärmedämmung ergibt sich eine Gesamtwärmeabgabe von 30 W/m, für die Sockelschleife 27,1 W/m Heizleitung und für die Laibungsschleife ca. 33 W/m. Die Wärmeabgabe wird mit Dämmung um etwa 3 W/m Heizleitung reduziert.

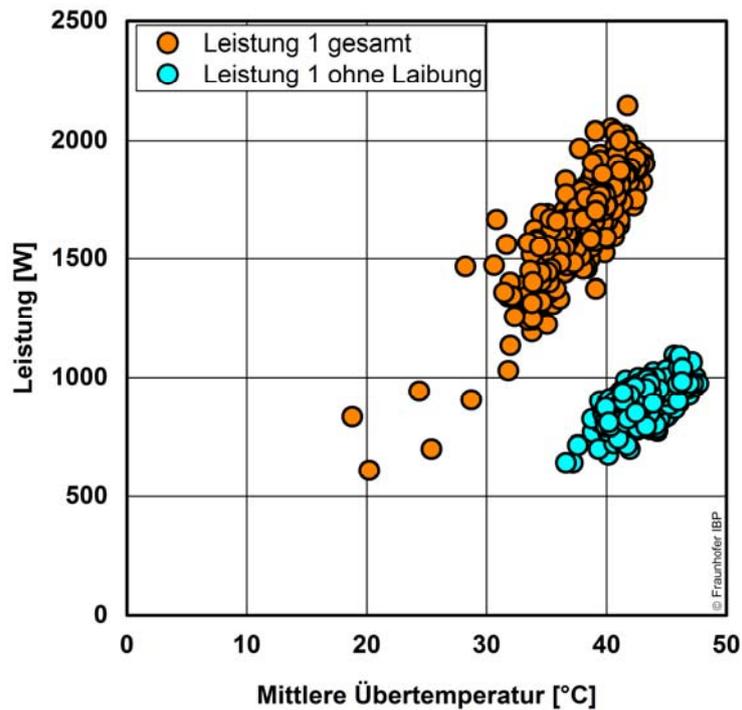


Bild 64:
 Streudiagramm der Wärmeabgabe der Temperierschleife mit Wärmedämmung für den Zeitraum 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockeltemperierung ohne Laibungsschleifen) und 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung mit Laibungsschleifen) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur ($T_{mü}$).

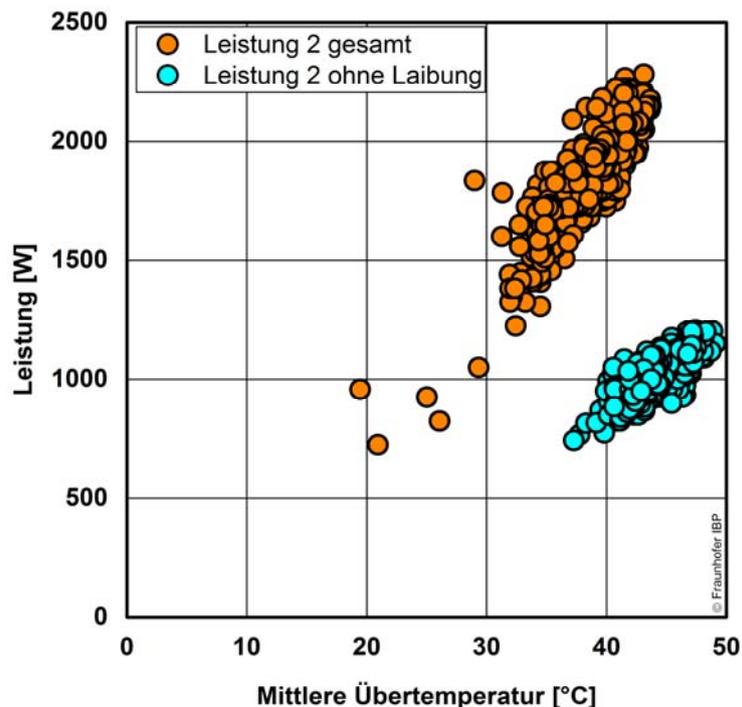


Bild 65:
 Streudiagramm der Wärmeabgabe der konventionell eingebauten Temperierschleife für den Zeitraum 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockel) und 18.1. bis

10.2.2017 (gesamte Temperierung) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur.

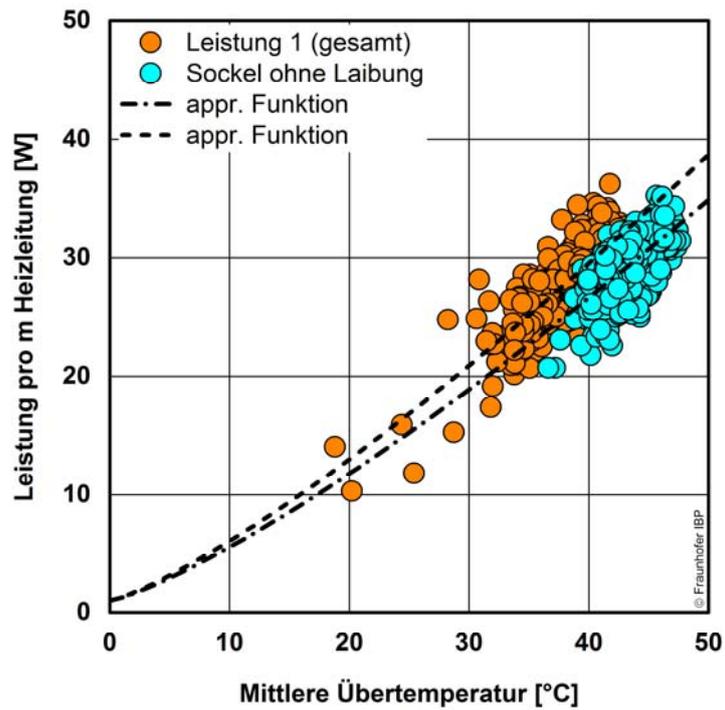


Bild 66: Streudiagramm der Wärmeabgabe der Temperierung mit Wärmedämmung je Meter Heizleitung vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockel) und 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur.

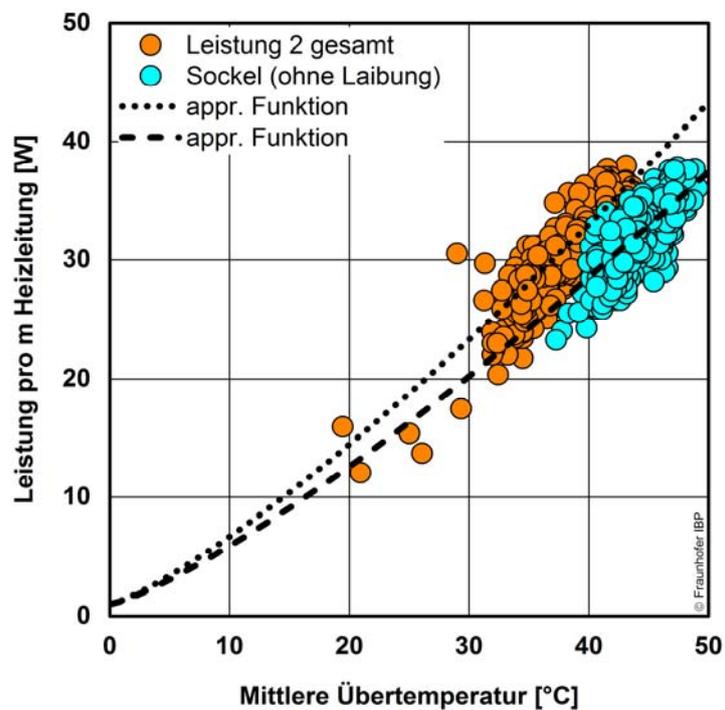


Bild 67:

Streudiagramm der Wärmeabgabe der konventionell eingebauten Temperierschleife je Meter Heizleitung vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockel) und vom 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur.

3.3 IR-Messung

Bild 68 zeigt den Flur im 2. Obergeschoss, von dem aus die untersuchten Zimmer zugänglich sind. In Bild 69 ist der gleiche Bildausschnitt mit einer Infrarot-Aufnahme abgebildet. Die an der Außenwand verlaufende Brüstungsschleife zeichnet sich hellrot bis rot deutlich ab. Im Boden-Sockelbereich scheint ebenfalls eine Temperierung montiert zu sein. Die hellgrünen Linien sind jedoch lediglich IR-Strahlungsreflektionen der im Brüstungsbereich montierten Temperierung.



Bild 68:
Flur im 2. Obergeschoss. Links im Bild sind die Zugangstüren zu den einzelnen Zellen (Räumen) erkennbar. Die erste Tür links mit Türnummer 205 führt in den Raum 2.27.

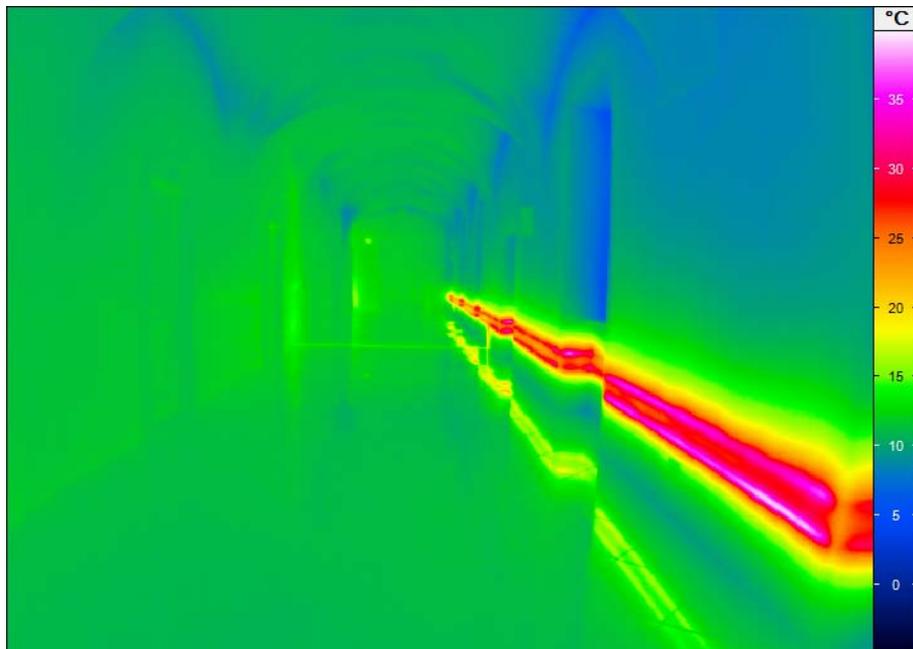


Bild 69:
IR-Aufnahme im Flur im 2. Obergeschoss. Die Außenwand wird nur mit einer Brüstungschleife temperiert. Am Boden spiegelt sich lediglich die Brüstungschleife.

3.3.1 Raum 2.26 mit Dämmung hinter der Temperierung

Bild 70 zeigt die visuelle bzw. IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.26. Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert, der auf Wunsch des Betreibers zur Sicherstellung einer ausreichenden Aufheizleistung bzw. von behaglichen Raumtemperaturen für den Pensionsbetrieb vorgehalten wird.



Bild 70:
Außenwand mit Fenster und elektrischem Konvektor in der Fensternische im Raum 2.26 (Türnummer 206). Rechts ist die IR-Aufnahme des gleichen Bildausschnitts dargestellt. Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

3.3.2 Raum 2.27 mit Dämmung hinter der Temperierung

Bild 71 zeigt eine IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.27. Die Außenwand wird ebenfalls mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In Bild 72 und Bild 73 ist die Laibung visuell und als IR-Aufnahme dargestellt. In der Nische ist auch hier ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert, der auf Wunsch des Betreibers zur Sicherstellung einer ausreichenden Aufheizleistung bzw. von behaglichen Raumtemperaturen für den Pensionsbetrieb vorgehalten wird (siehe Bild 74 und Bild 75). Zur Überprüfung der Wirkung der Temperierung hinter dem auf Abstand zur Wandoberfläche montierten elektrischen Heizkörpers wurde dieser demontiert (Bild 76) und die Wandnische erneut thermographiert (Bild 77).

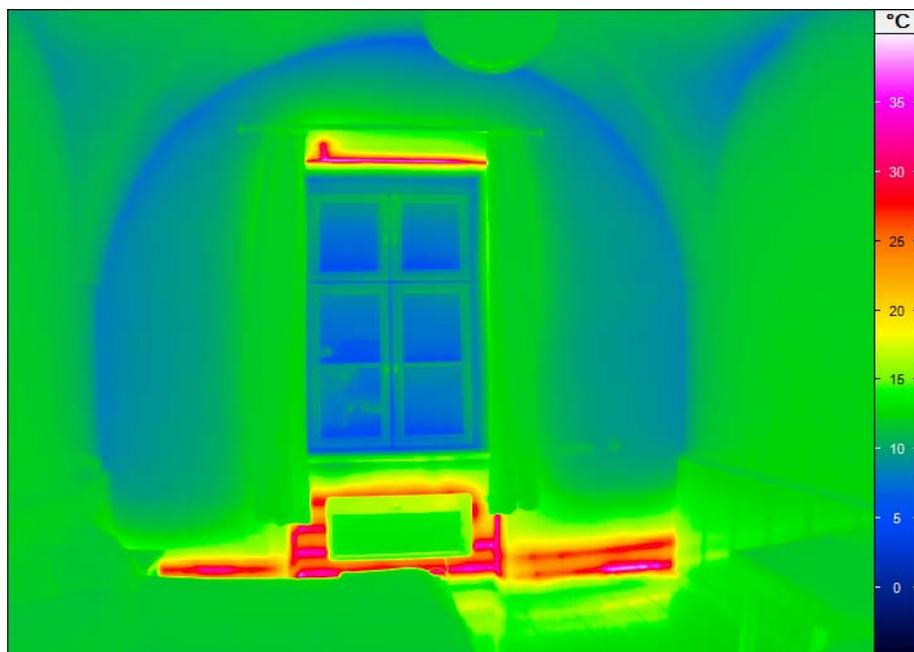


Bild 71:
IR-Aufnahme im Raum 2.27 (Türnummer 205). Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.



Bild 72:
Abbildung des Fensters mit Fensterlaibung im Raum 2.27 (Türnummer 205). Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

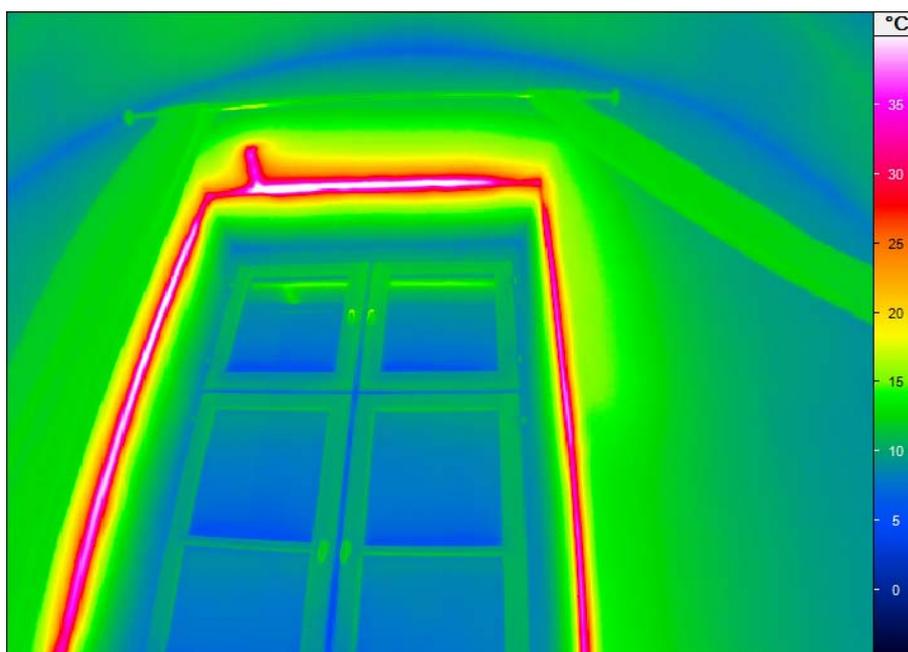


Bild 73:
IR-Aufnahme im Raum 2.27 (Türnummer 205). Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.



Bild 74:
Visuelle Aufnahme im Raum 2.27 (Türnummer 205) in der Fensternische.
Rechts neben dem Konvektor ist der Thermostatkopf erkennbar, der die zusätzliche Heizschleife in der Laibung abhängig von der Raumtemperatur regelt.

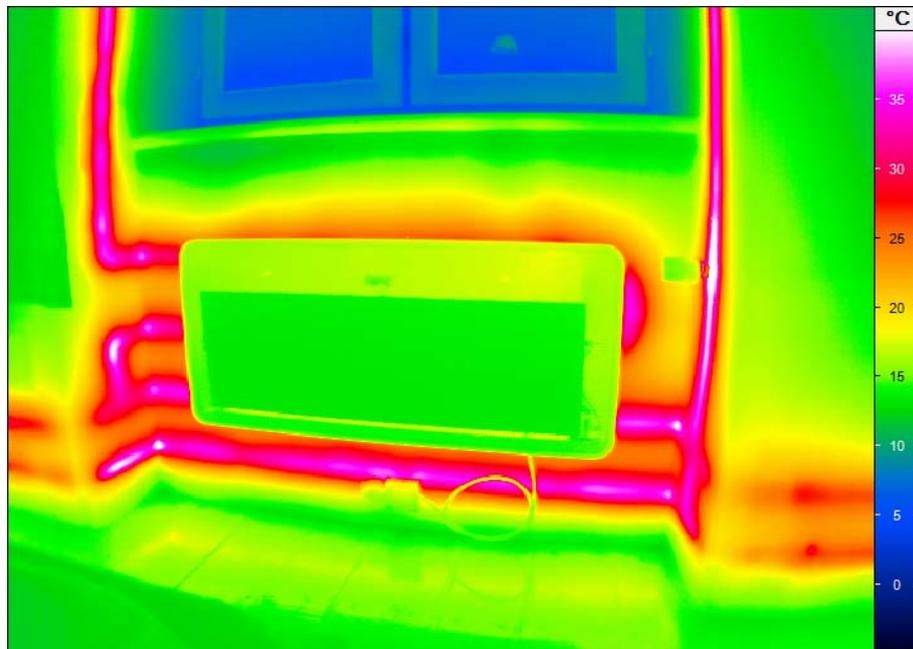


Bild 75:
Detail IR-Aufnahme im Raum 2.27 (Türnummer 205) in der Fensternische, mit zusätzlichem elektrischen Konvektor in der Nische.



Bild 76:
Detailaufnahme der Fensternische mit abmontierten elektrischen Konvektor am Boden liegend.

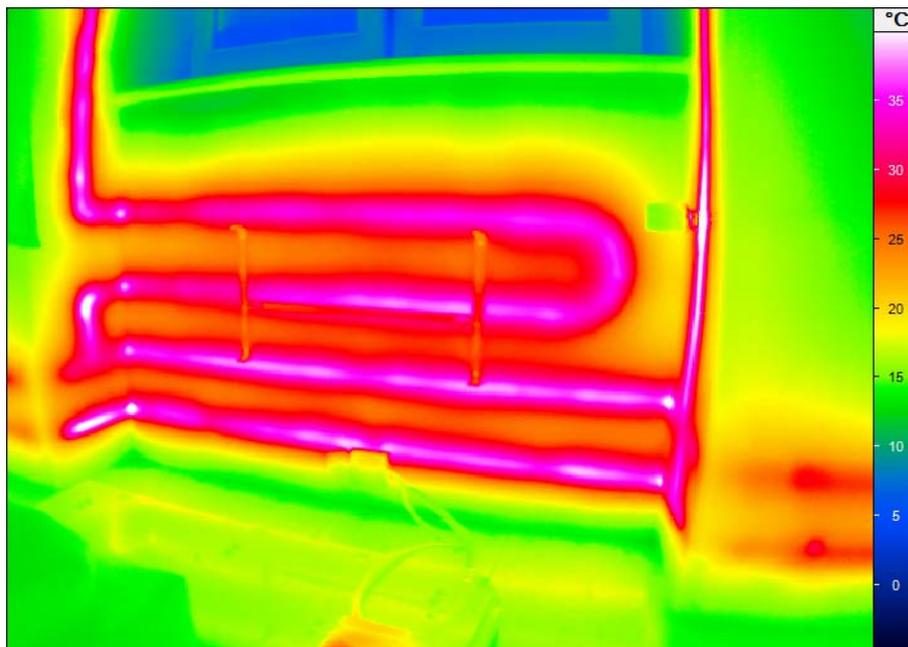


Bild 77:
Detail IR-Aufnahme im Raum 2.27 (Türnummer 205) ohne elektrischen Konvektor (liegt abmontiert am Boden). Die zusätzliche Heizleitung in der Fensterlaibung wurde mit einer zusätzlichen Schleife in der Nische verlegt.

3.3.3 Raum 2.28 mit Dämmung hinter der Temperierung

Bild 78 zeigt die visuelle bzw. IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.28. Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

In der Zwischenwand zum Raum 2.29 sind die Zuleitungen zu der Temperierschleife für die Räume 2.26 bis 2.28 und der Temperierschleife für die Räume 2.29 bis 2.31 wärmegeädämmt unter Putz verlegt (Bild 79). In der IR-Aufnahme in Bild 80 zeichnen sich deutlich erhöhte Oberflächentemperaturen durch die gedämmten Heizleitungen ab.

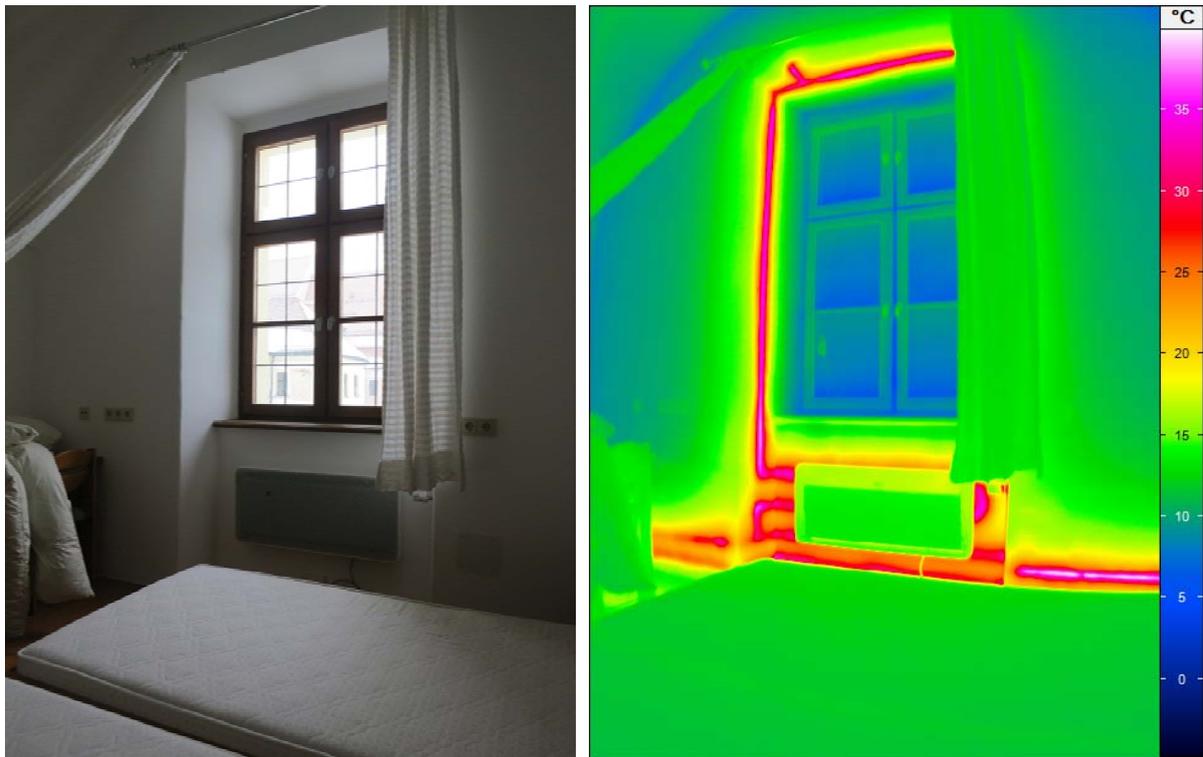


Bild 78:

Links Ansicht der Innenwand im Raum 2.28 (Türnummer 204) angrenzend zum Raum 2.29 (Türnummer 203). Rechts ist die IR-Aufnahme der Innenwand im gleichen Bildausschnitt dargestellt. Im Sockelbereich zeigen sich deutlich erhöhte Temperaturen durch die in der Wand verlegten wärmegeädämmtten Heizrohre.



Bild 79:
Ansicht der Innenwand im Raum 2.28 (Türnummer 204) angrenzend zum Raum 2.29 (Türnummer 203).

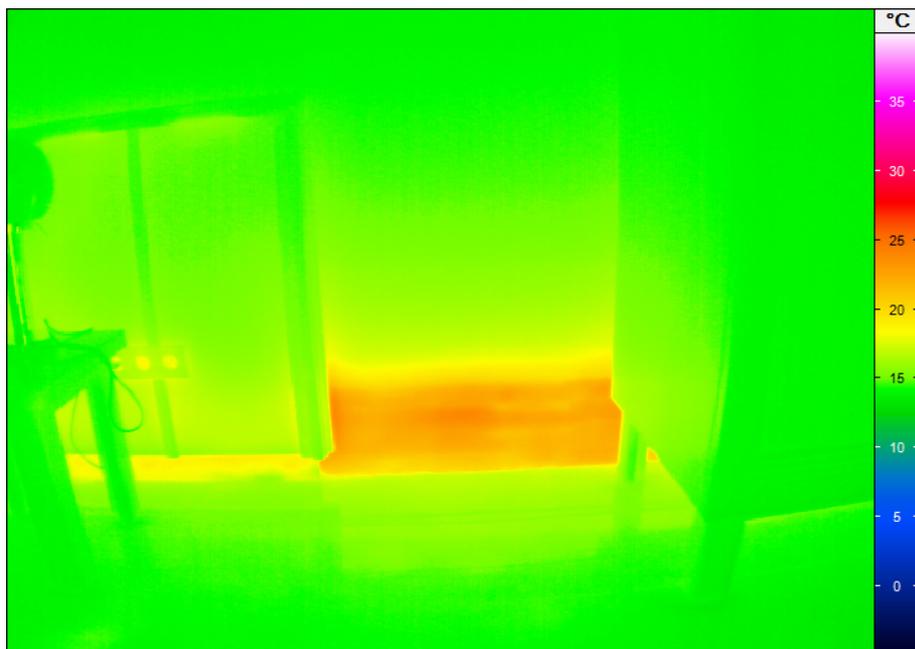


Bild 80:
IR-Aufnahme der Innenwand im Raum 2.28 (Türnummer 204) angrenzend zum Raum 2.29 (Türnummer 203). Im Sockelbereich zeigen sich deutlich erhöhte Temperaturen durch die in der Wand verlegten wärmeisolierten Heizrohre.

3.3.4 Raum 2.29 ohne Dämmung hinter der Temperierung

Bild 81 und Bild 82 zeigen die visuelle bzw. IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.29. Die Außenwand wird auch hier mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

In der Zwischenwand zum Raum 2.28 sind die Zuleitungen zu der Temperierschleife für die Räume 2.26 bis 2.28 und der Temperierschleife für die Räume 2.29 bis 2.31 wärmegeklämt unter Putz verlegt (Bild 79). In der IR-Aufnahme in Bild 84 zeichnen sich nur gering erhöhte Oberflächentemperaturen durch die gedämmten Heizleitungen ab. Dies deutet darauf hin, dass die Heizrohre nur auf der Raumseite des Raumes 2.28 verlegt wurden. Dennoch ist eine geringfügig höhere Oberflächentemperatur zu erkennen.



Bild 81:
Ansicht der Außenwand mit Fenster im Raum 2.29 (Türnummer 203).

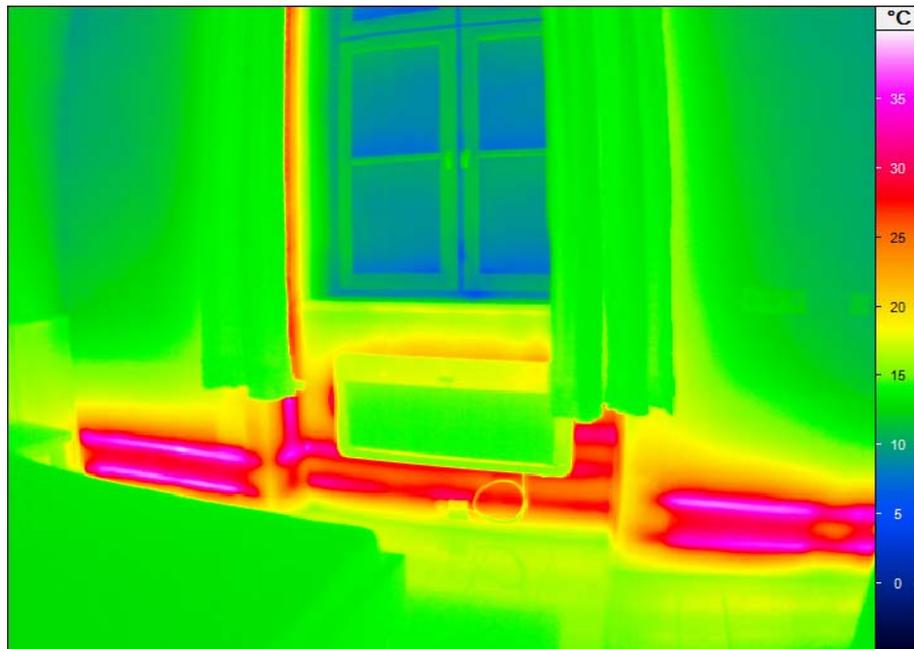


Bild 82:
IR-Aufnahme im Raum 2.29 (Türnummer 203). Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.



Bild 83:
Ansicht der Innenwand im Raum 2.29 (Türnummer 203) angrenzend zum Raum 2.28 (Türnummer 204).

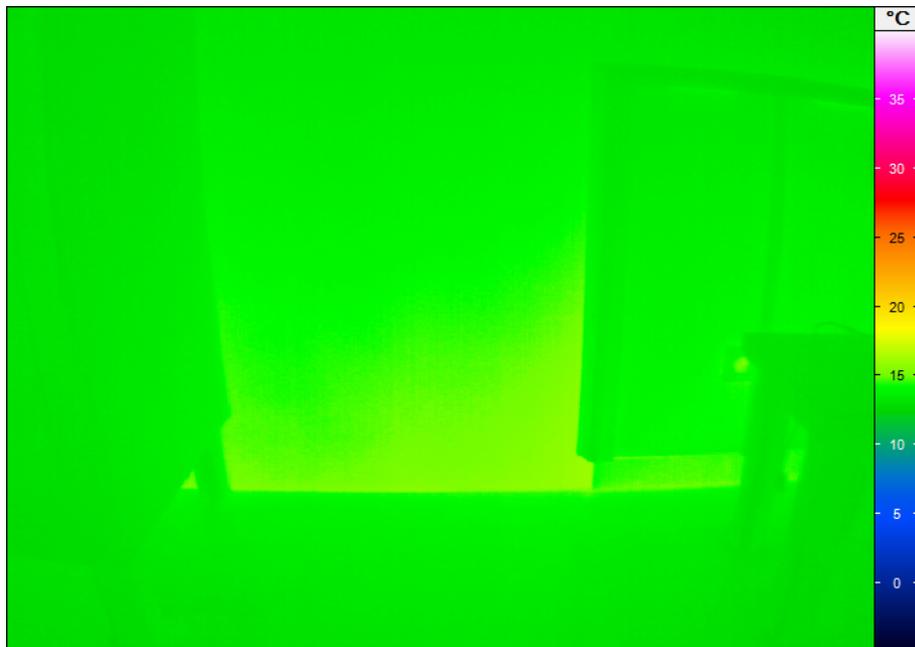


Bild 84:
IR-Aufnahme der Innenwand im Raum 2.29 (Türnummer 203) zum Raum 2.28.
Im Sockelbereich zeigen sich leicht erhöhte Temperaturen durch die in der Wand verlegten wärme gedämmten Heizrohre.

3.3.5 Raum 2.30 ohne Dämmung hinter der Temperierung

Bild 85 und Bild 86 zeigen die visuelle bzw. IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.30. Die Außenwand wird auch hier mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist auch hier ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert,



Bild 85:
Ansicht der Außenwand mit Fenster im Raum 2.30 (Türnummer 202).

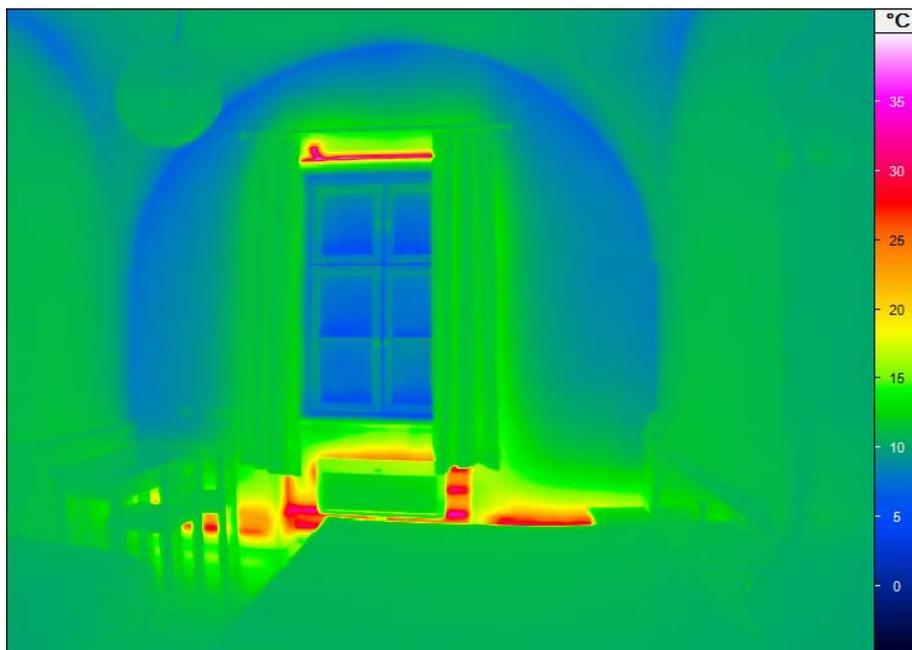


Bild 86:
IR-Aufnahme im Raum 2.30 (Türnummer 202). Die Außenwand wird mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

3.3.6 Raum 2.31 ohne Dämmung hinter der Temperierung

Bild 78 und Bild 88 zeigen die visuelle bzw. IR-Aufnahme der Außenwand mit Fenster im Raum 2.31. Die Außenwand wird hier ebenfalls mit einer Sockelschleife temperiert sowie mit einer zusätzlichen über ein Thermostat zuschaltbaren Heizschleife in der Laibung. In der Nische ist ein zusätzlicher elektrischer Konvektor montiert.

In der Zwischenwand zum Raum 2.29 sind die Zuleitungen zu der Temperierschleife für die Räume 2.26 bis 2.28 und der Temperierschleife für die Räume 2.29 bis 2.31 wärmegeklämt unter Putz verlegt (Bild 79). In der IR-Aufnahme in Bild 80 zeichnen sich deutlich erhöhte Oberflächentemperaturen durch die gedämmten Heizleitungen ab.

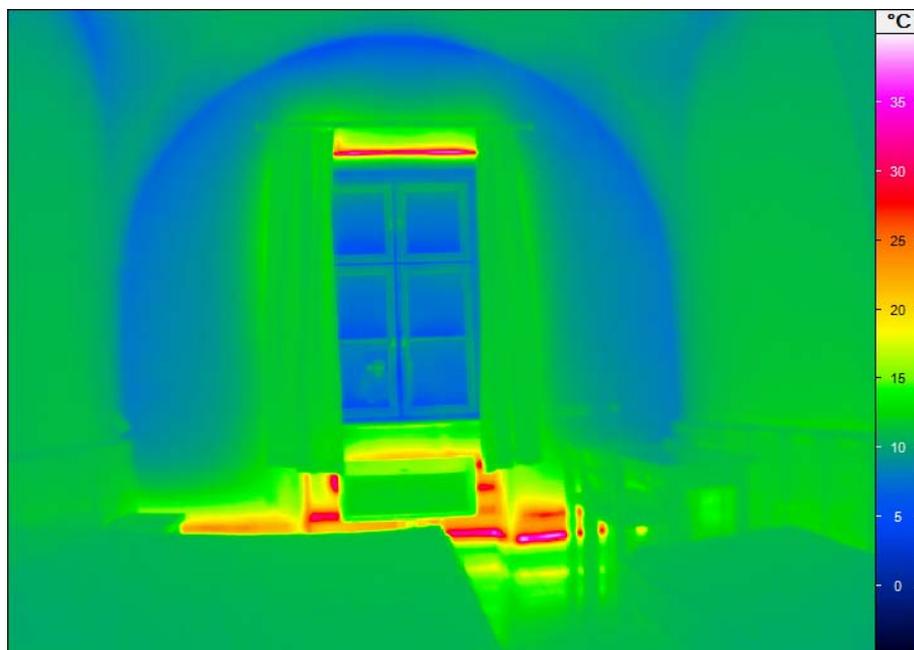


Bild 87:
IR-Aufnahme der Außenwand im Raum 2.31 (Türnummer 201) mit Sockelschleife und Heizleitung in der Fensterlaibung. Der elektrische Konvektor in der Fensternische ist nicht in Betrieb.

3.3.7 Wasserschaden an der Decke Raum 2.30 und 2.31

Einige Tage vor den IR-Aufnahmen geschah ein Rohrbruch in einer wasserführenden Leitung über der Decke zwischen den Räumen 2.30 und 2.31. Die visuellen Bilder und IR-Aufnahmen Bild 89 bis Bild 91 zeigen das Deckengewölbe im Raum 2.30, Flur und Raum 2.31. Die sich in der IR-Aufnahme dunkelblau abzeichnenden Flächen kühlen durch die Verdunstung der eingesickerten Feuchte gegenüber den trockenen Bereichen ab. Die nassen Bereiche lassen sich daher mit der IR-Thermographie eindeutig lokalisieren.



Bild 88:
Detailaufnahme der Kreuzgewölbedecke im Bereich des Wasserschadens im Raum 2.30 (Türnummer 202).

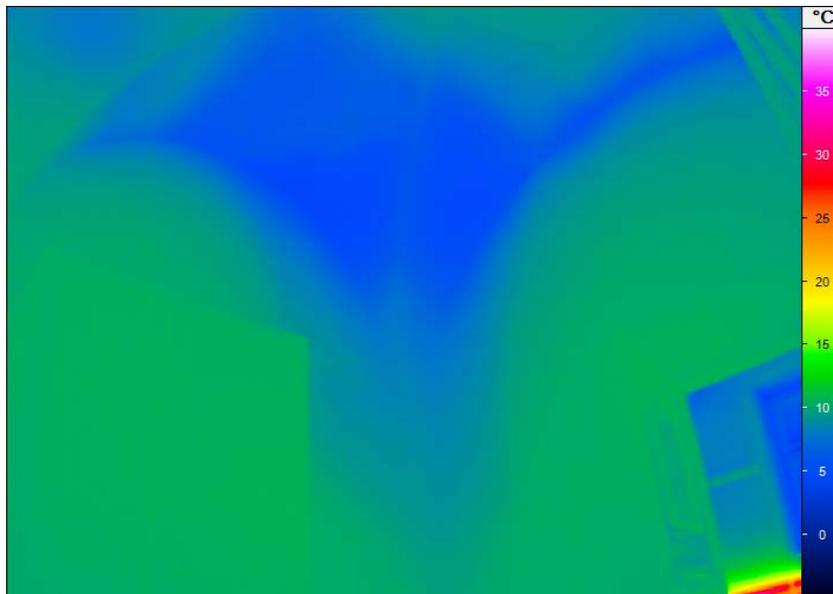


Bild 89:
IR- Aufnahme der Kreuzgewölbedecke im Bereich des Wasserschadens im Raum 2.30 (Türnummer 202). Die dunkelblauen Bereiche zeigen die durchfeuchteten Stellen an.



Bild 90:
Detailaufnahme der Kreuzgewölbedecke im Bereich des Wasserschadens im Raum 2.31 (Türnummer 201).

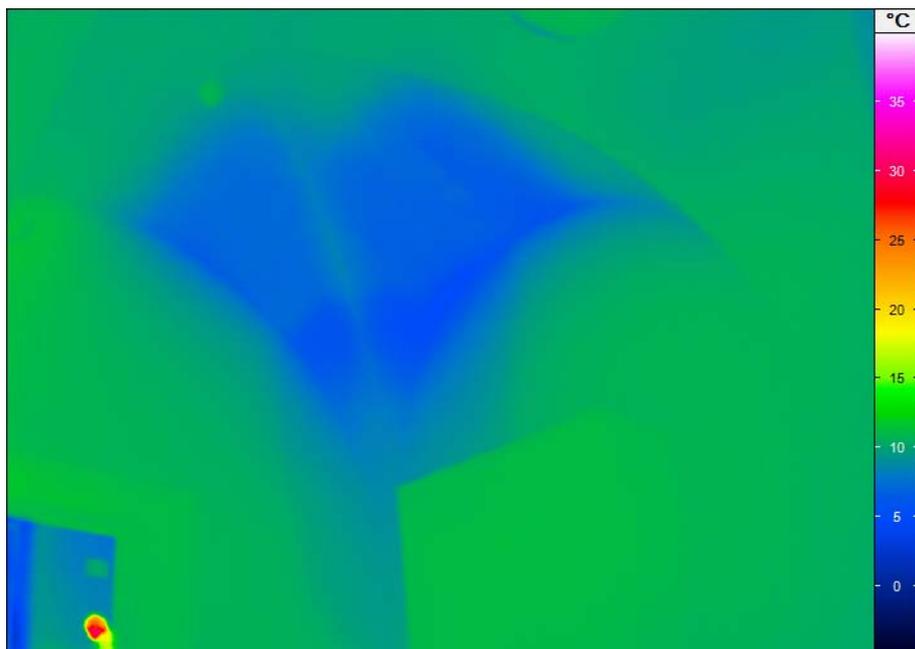


Bild 91:
IR- Aufnahme der Kreuzgewölbedecke im Bereich des Wasserschadens im Raum 2.31. Die dunkelblauen Bereiche zeigen die durchfeuchteten Stellen an.



Bild 92:
Detailaufnahme der Kreuzgewölbedecke im Flur zwischen Raum 2.30 (Türnummer 202) und 2.31 (Türnummer 201) im Bereich des Wasserschadens.

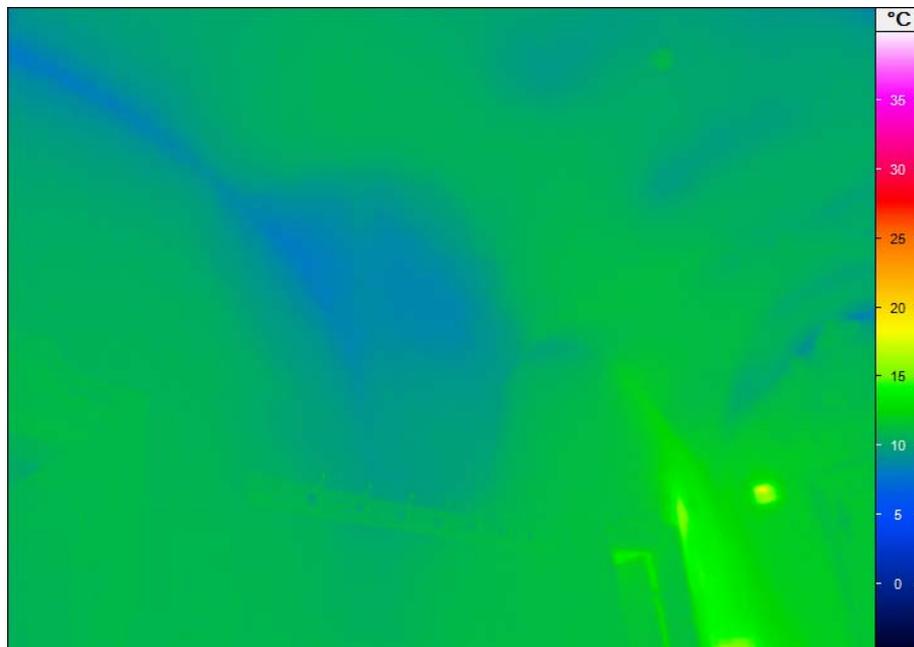


Bild 93:
Detail IR-Aufnahme der Gewölbedecke im Flur zwischen Raum 2.30 (Türnummer 202) und 2.31 (Türnummer 201) im Bereich des Wasserschadens. Die dunkelblauen Bereiche zeigen die durchfeuchteten Stellen an.

3.3.8 IR-Aufnahmen Außen

Bild 94 zeigt eine Übersicht der untersuchten Räume mit einer Außenaufnahme des Klosterflügels. In Bild 95 ist der gleiche Bildausschnitt mit einer IR-Aufnahme abgebildet. Bild 96 bis Bild 100 zeigt jeweils eine Detail-IR-Aufnahme der Außenwand. Die Wirkung der konventionell eingebauten Bauteiltemperierung zeichnet sich mit deutlich höheren Oberflächentemperaturen im Vergleich zu der wärmegeämmten Temperierung ab.



Bild 94:
 Nordseitige Außenaufnahme des Südflügels des Klosters. Im zweiten Obergeschoss befinden sich die untersuchten Räume mit konventioneller Bauteiltemperierung und gedämmter Temperierung.

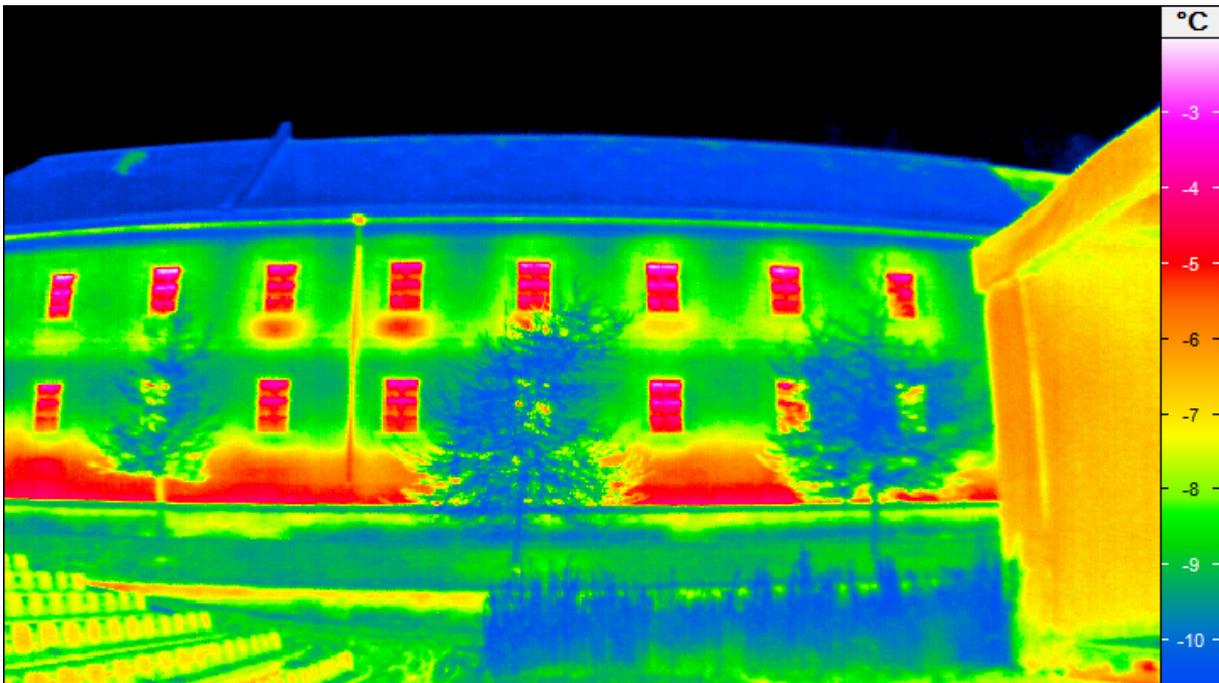


Bild 95:
 IR-Bild der Nordseite des Südflügels des Klosters. Im zweiten Obergeschoße befinden sich die untersuchten Räume mit konventioneller Bauteiltemperierung und gedämmter Temperierung.

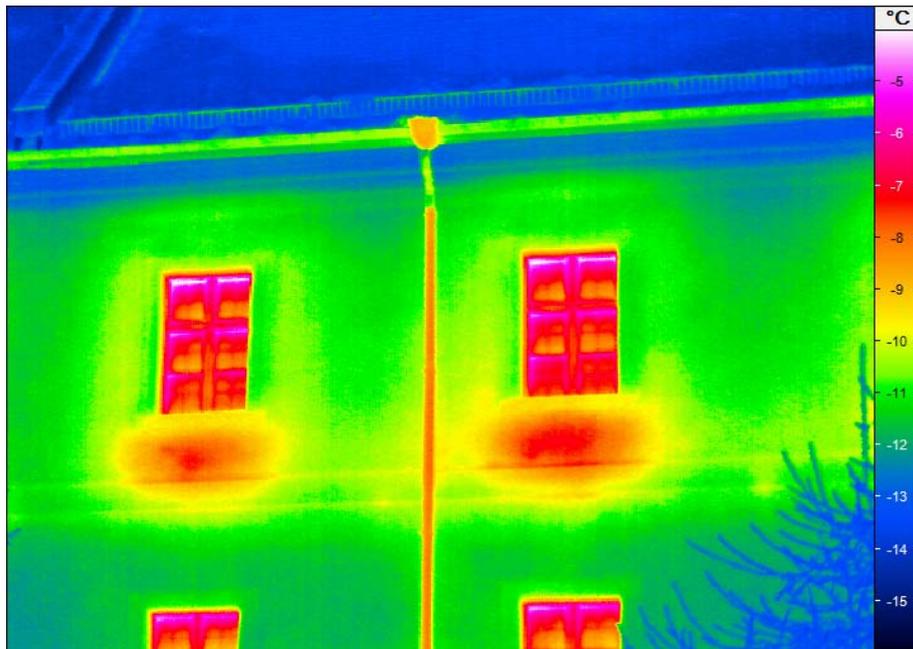


Bild 96:
IR-Detaillaufnahme der Außenwand der Zimmer 2.31 (links) 2.30 (rechts) mit konventioneller Bauteiltemperierung.



Bild 97:
IR-Detaillaufnahme der Außenwand des Zimmers 2.29 (links) mit konventioneller Bauteiltemperierung.

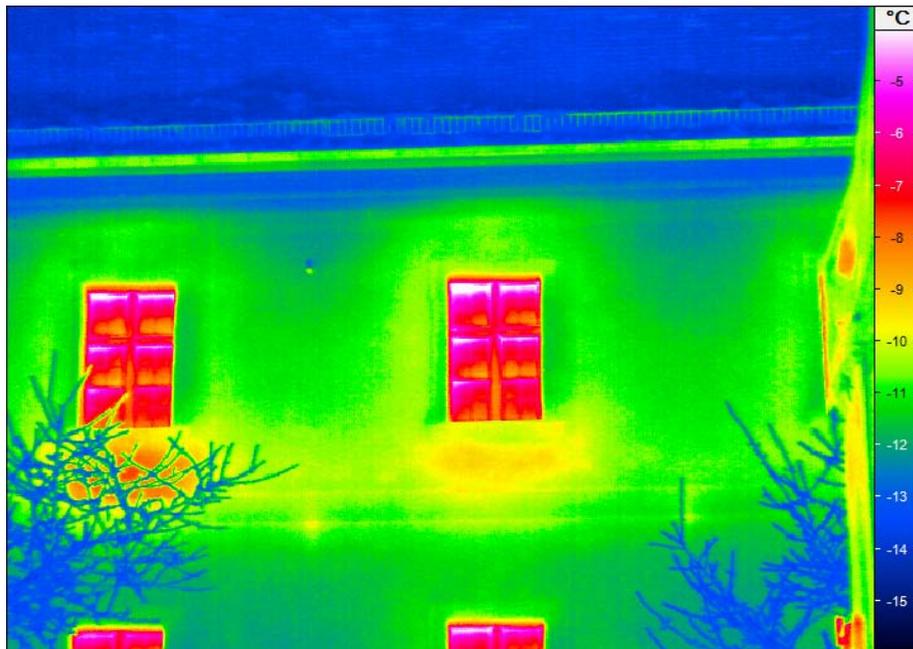


Bild 98:
IR-Detailaufnahme der Außenwand des Zimmers 2.28 (rechtes Fenster) mit Wärmedämmung zwischen Bauteiltemperierung und Mauerwerk.

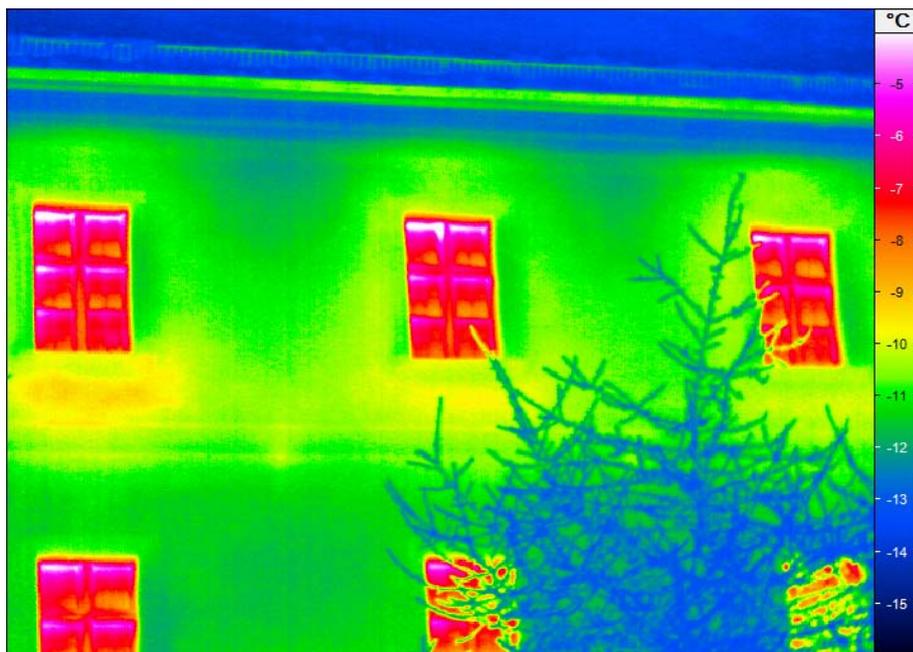


Bild 99:
IR-Detailaufnahme der Außenwand der Zimmer 2.28 (linkes Fenster), 2.27 (mit-
tiges Fenster) und 2.26 (rechtes Fenster) mit Wärmedämmung zwischen Bau-
teilvertemperierung und Mauerwerk.

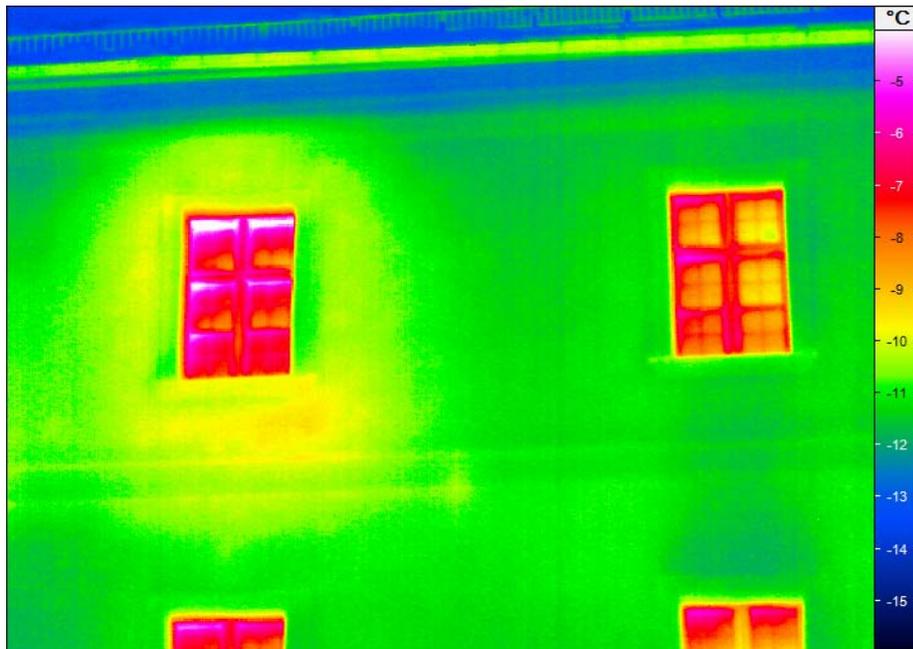


Bild 100:
IR-Detailaufnahme der Außenwand des Zimmer 2.26 (linkes Fenster) mit wärmegegedämmter Temperierung und des nicht temperierten Treppenhauses (rechtes Fenster).

4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Es werden zwei unterschiedlich verlegte Bauteiltemperierungen untersucht. Die Reverenzvariante entspricht der üblichen Montagepraxis für Bauteiltemperierung direkt im Mauerwerk eingeputzt verlegt, bei der in der Regel der konservatorische Fokus zur Erhaltung der Bausubstanz überwiegt. Die zweite Variante ist zur Einsparung von Energie optimiert. Hierfür wird eine innovativ gedämmte Variante des klassischen Einbaus entwickelt, zum Einsatz gebracht und der Energieverbrauch vergleichend in situ untersucht.

Die Optimierung des bekannten Einbaus der Temperierung unter Putz erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware WUFI® 2D. Mit dieser Software ist es möglich, die Auswirkungen der Heizleitung unter Putz auf das Mauerwerk zu untersuchen. Für die optimale energiesparende Auslegung wird dazu eine Dämmschicht direkt hinter der Heizleitung angeordnet. Die vier Parameter der Anordnung und Abmessung der Dämmschicht sowie der Heizleitung unter Putz werden in 15 Varianten untersucht. Die Effizienz der Varianten wird mit der Referenzvariante verglichen. Bewertet werden die direkten zusätzlichen Wärmeströme der Temperierung nach außen. Eine Verringerung des direkten Wärmestroms nach außen bedeutet einen effizienter Betrieb und wird als Verhältnis der Wärmestromdifferenz (Referenz – Variante) zum Wärmestrom der Referenz beschrieben.

Die Bauteilgeometrie und mögliche Ausführung der Dämmung sind durch bauliche Gegebenheiten und denkmalpflegerische Vorgaben bestimmt. Dadurch beschränkt sich die Dicke und Breite des Dämmstoffes sowie die Wärmeleitfä-

higkeit. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Anordnung und Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmstoffe der kompletten Parameterstudie sind in Bild 18 abgebildet. Alle untersuchten Varianten mit Dämmung haben einen geringeren Wärmestrom nach außen im Vergleich zur Referenz ohne Wärmedämmung. Durch die Wärmedämmung reduziert sich jedoch auch der Wärmestrom nach innen in den Raum. Insgesamt wird die Gesamtwärmeabgabe der Temperierung durch die Wärmedämmung reduziert. Um den gleichen Wärmestromanteil nach innen zu erhalten wie die Referenz, wird dadurch ein längere Heizleitung (oder alternativ eine Erhöhung der Vorlauftemperatur) erforderlich. Dadurch erhöht sich wiederum der nach außen abgegebene Wärmestrom. In Bild 101 sind die für das Kloster Aldersbach relevanten Varianten sowie zwei weitere Varianten der Parameterstudie nochmal dargestellt. Die zur Ausführung empfohlene Variante (14) ist im Diagramm hervorgehoben. Aus dem Diagramm geht je Variante die zusätzlich erforderliche Leitungslänge zur Erreichung der gleich hohen Wärmeabgabe nach innen hervor, sowie die Energieeinsparung durch geringere direkte Wärmestromverluste nach außen im Vergleich zur Referenz. Anhand der Parameterstudie wird für die tatsächliche Einbausituation die Reduzierung der direkten Wärmeverluste auf 10 % bis 15 % abgeschätzt. Die Reduzierung der Gesamtwärmeabgabe wird ebenfalls auf 10 % und 15 % abgeschätzt, d.h. für die gleiche Wärmeabgabe nach innen wäre die Leitungslänge der Temperierung um den Faktor 1,1 bis 1,15 zu erhöhen. Aus bautechnischen Gründen wurde die Verleganordnung in allen Räumen gleich ausgeführt und ist damit als gleich lang anzusehen.

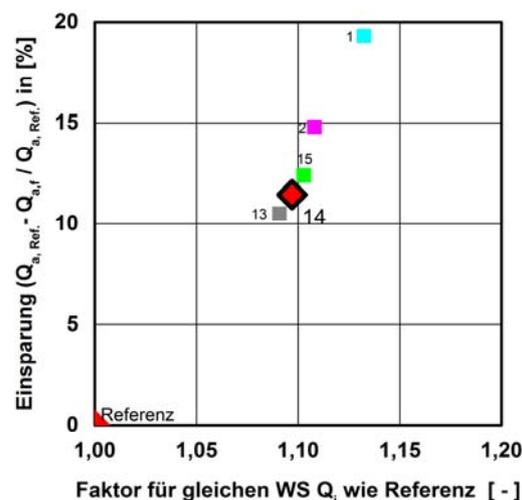


Bild 101:

Einsparung der direkten Wärmestromverluste der einzelnen Varianten in Abhängigkeit von dem damit verbundenen berechneten Faktor f_{Q_i} für eine gleiche Wärmeabgabe wie die Referenz. Die empfohlene Ausführungsvariante ist hervorgehoben (14).

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden im Obergeschoss des ehemaligen Klosters im Südostflügel sechs Räume identifiziert, die im Wesentlichen gleich ausgeführt sind. Zur Überprüfung und Dokumentation erfolgte der Einbau der innovativen und energieeffizienten Temperierung in drei Räumen. Für den direkten Vergleich wurden in den verbleibenden drei Räumen die Tempe-

rierung in konventioneller Einbauweise ohne Wärmedämmung eingebaut. Für den Einbau der Grundvariante der Temperierung erfolgten anhand der Parameterstudie Vorgaben zur genauen Positionierung der Heizleitung unter Putz. Für eine ausreichende Wärmeabgabe erfolgte die Verlegung der Temperierleitung mit zusätzlichen Mäandern in der Nische.

Durch die Wärmedämmung im Bereich der Heizleitung und der Fensternische wie ausgeführt, reduziert sich der Wärmebedarf der Räume geringfügig. Bei einer vereinfachten flächenanteiligen Betrachtung der zusätzlichen Dämmwirkung durch den Dämmstreifen ergibt sich eine Reduktion der U-Werte um ca. 5 %. Die Wärmedämmung kompensiert damit zu einem Teil die Verringerung der Wärmeabgabe der Temperierung, sodass im Rahmen der Genauigkeit des Untersuchungsaufbaus keine nennenswerten Abweichungen der Raumtemperaturen erwartet werden.

Die Auswertung der Messungen ergibt im Vergleich zueinander für den ausgewerteten Messzeitraum des Leistungsvergleichs in etwa gleich hohe Raumtemperaturen. Die verringerte Wärmeabgabe der Temperierung mit Wärmedämmung wirkte sich nicht nachteilig auf die Raumtemperatur aus. Die kumulierte Wärmeabgabe beider Varianten bestätigt die in der rechnerischen Voruntersuchung festgestellte Wirkung der Wärmedämmung auf die Wärmeabgabe der Temperierung, siehe Bild 102. Die Wärmeabgabe reduziert sich für den ersten Zeitraum mit Sockeltemperierung um rund 12 % und im zweiten Zeitraum mit Sockeltemperierung und Laibungsschleife um rund 10 % im Vergleich zum konventionellen Einbau ohne Wärmedämmung.

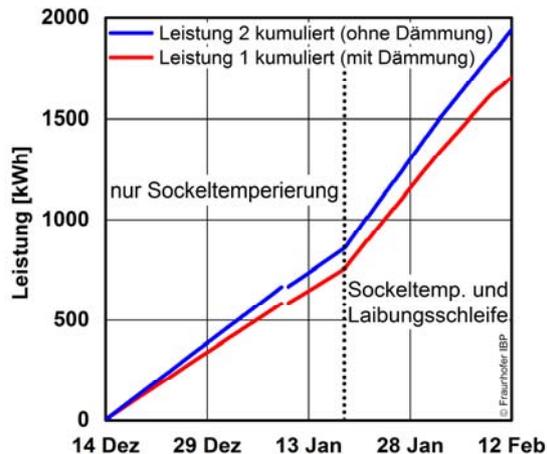


Bild 102:
Kumulierte Leistung der Temperierung mit Wärmedämmung (Leistung 1) und Temperierung ohne Wärmedämmung (Leistung 2) für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.2.2017.

Die verringerte Wärmeabgabe der gedämmten Temperierung sowie die Unterschiede zwischen Sockelschleife und Laibungsschleife sind auch aus dem Streudiagramm in Bild 103 ablesbar. Die Wärmeabgabe je Meter Heizrohr ist in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur für beide eingebauten Varianten der Temperierung abgebildet.

Vergleicht man die berechnete Gesamtwärmeabgabe pro Meter Heizrohr mit der gemessenen Wärmeabgabe, so ergibt sich eine deutliche Abweichung. Die in der Realität geringere Wärmeabgabe im Vergleich zur berechneten Wärmeabgabe ist in einem stark reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten vom Heizrohr zur Wand begründet [17]. Zudem weicht die tatsächliche Ausführung an vielen Teilabschnitten der Temperierung von der idealisierten Modellbildung der Parameterstudie ab. Bei realen Einbauten sind häufig unterschiedliche bauliche Gegebenheiten zu berücksichtigen, die in unterschiedlichen Wärmeabgaben pro Meter Heizleitung resultieren. Abweichungen von der Modellbildung sind z.B. im Sockel, in der Nische oder bei den einbindenden Innenwänden durch die Bauteilgeometrie bzw. durch das baupraktische Vorgehen begründet. Für die Sockelschleife wurde anstatt zwei schmaler Schlitze ein breiter Schlitz ausgeführt und auf die komplette Breite gedämmt, im Bereich der Fensternische wurde die komplette Nische gedämmt. Der Einbau der Temperierung in der Laibung entspricht zwar der Modellbildung in der Simulation jedoch weichen Bauteilgeometrie der Laibungssituation vom Regelquerschnitt der Wand ab.

Der berechnete Gesamtwärmestrom beträgt für die Referenztemperierung (ohne Wärmedämmung) in der Parameterstudie 51,4 W/m und für die gedämmte Temperierung in der Variante entsprechend dem Einbau in der Laibung 46,2 W/m. Die Verringerung der Wärmeabgabe beträgt demnach 5,2 W/m. Die gemessene Gesamtwärmeabgabe pro Meter Heizrohr beträgt für die konventionell eingebaute Temperierung ca. 33 Watt und für die gedämmte Temperierung ca. 29,9 Watt. Berücksichtigt man die in der realen Anwendung geringere Wärmeabgaben und berechnet die Verringerung durch die Wärmedämmung näherungsweise proportional, ergibt sich eine prognostizierte Einsparung von ca. 3,3 W/m. Es liegt damit eine gute Übereinstimmung mit der aus den Messwerten ermittelte Reduzierung von ca. 3,1 W/m vor.

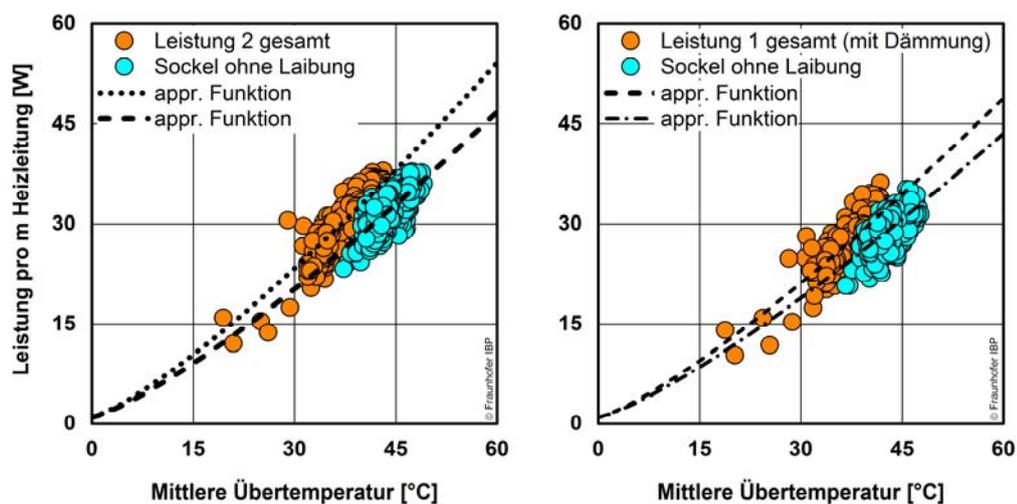


Bild 103:

Streudiagramm der Wärmeabgabe der konventionell eingebauten Temperierung (links) und Temperierung mit Wärmedämmung (rechts) je Meter Heizleitung vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockel) und vom 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur.

Der für das Kloster Aldersbach konzipierte innovative und energieeffiziente Einbau der Temperierung mit Wärmedämmung erreicht eine Energieeinsparung von rund 11 % gegenüber dem konventionellen Einbau der Temperierung für den betrachteten Messzeitraum vom 14.12.2016 bis 18.1.2017. Die Energieeinsparung ist in erster Linie auf die verringerte Wärmeabgabe durch die Wärmedämmung zurückzuführen. Dabei stellen sich zwei Effekte ein. Zum einen werden die direkten Wärmeverluste nach außen reduziert. Zum anderen reduziert sich der Heizwärmebedarf des Raumes durch die Wärmedämmung hinter der Temperierleitung. Dadurch werden die Räume trotz geringerer Wärmeabgabe nach innen im Vergleich zur Temperierung ohne Wärmedämmung in etwa gleich warm. Die positive Wirkung der Wärmedämmung auf die Außenoberflächentemperaturen können anhand der IR-Thermographien eindeutig abgelesen werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [2] Holm, A. und Künzel, H.M. (1998): Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwollplatten in Wärmedämmverbundsystemen. wksb 43, H. 41, S. 2-6.
- [3] Krus, M., Künzel, H.M. (1996): Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden. Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- [4] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K. (1996): Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart.
- [5] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- [6] Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, S. 5-19.
- [7] Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, S. 267-279.
- [8] Künzel, H.M. und Kießl, K. (1998): Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau aktuell 98, S. D.50-D.56. Werner-Verlag, Düsseldorf 1998.
- [9] Künzel, H. (1998): Feuchteschutz durch Wandtemperierung. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Holzkirchen. Valley (IBP-Mitteilung, 339).
- [10] Künzel, H. (2000): Verbesserung der Raumklima- und Feuchteverhältnisse in historischen Gebäuden durch gesteuertes Heizen und Lüften. In: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Hg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden. München. Bietigheim-Bissingen, S. 71–88.
- [11] Künzel, H.(2007): Gelungene Sanierung durch Bauteiltemperierung am Beispiel der Salinenkapelle St. Rupert in Bad Reichenhall. In: Jürgen Gänssmantel und Clemens Hecht (Hg.): Bauinstandsetzen und Bauphysik. Restau-

ration and building-physics. 2007. Aufl. München: WTA-Publications (WTA-Almanach, 2007), S. 349–368.

- [12] Künzel, H. (2009): Bauphysik und Denkmalpflege. 2. erweiterte Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [13] Krus, M.; Kilian, R.(2012): Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung – Feuchtetechnische und wärmetechnische Aspekte. In: BauSIM Tagungsband 2012, S. 48–54.
- [14] Bichlmair, S.; Raffler, S.; Kilian, R. (2015): The Temperierung heating systems as a retrofitting tool for the preventive conservation of historic museums buildings and exhibits. In: Energy and Buildings (95), S. 80–85.
- [15] Krus, M.; Kilian, R. (2014): Die Bauteiltemperierung - Untersuchung des Feuchtetransportes und Energieverbrauchs durch hygrothermische Simulation am Beispiel der Renatuskapelle. In: BLfD (Hg.): Die Temperierung. Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. München: Volk (Inhalte - Projekte - Dokumentationen, 8), S. 47–52.
- [16] Bichlmair, S. (2014): Bauphysikalische Untersuchungen zur Bauteiltemperierung im Forschungsprojekt. In: BLfD (Hg.): Die Temperierung. Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. München: Volk (Inhalte - Projekte - Dokumentationen, 8), S. 30–38.
- [17] Bichlmair, S.: Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise – Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion. Dissertation, aktuell in Bearbeitung. TU München.

Anhang

A.1 Dokumentation Datenlogger



Bild 104:
Anordnung eines Datenloggers (D&K 0959) neben dem Raumluftfühler auf dem Toiletteneinbau (roter Kreis) im Raum 2.27.



Bild 105:
Detailaufnahme des Datenloggers (roter Kreis) mit Kombisensor im Raum 2.27 direkt neben dem Raumluftfühler des Messnetzes (Kreis gestrichelt).

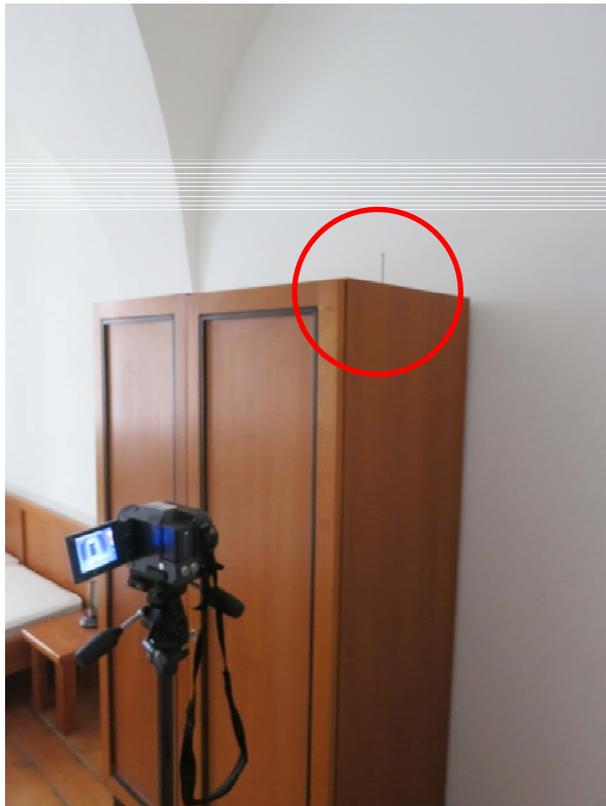


Bild 106:
Anordnung eines Datenloggers (D&K 0848) im Raum 2.30 auf dem Kleiderschrank (rote Kreis).



Bild 107:
Detailaufnahme des Datenloggers (roter Kreis) im Raum 2.30 auf dem Kleiderschrank.