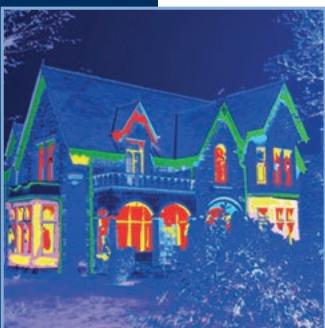
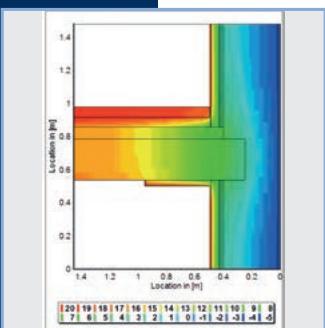
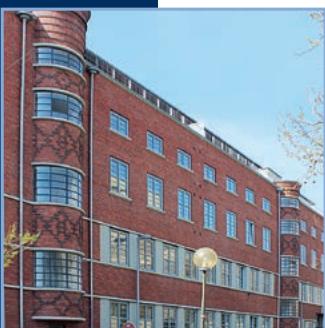


# 4. Innendämmkongress

## Beiträge aus Wissenschaft und Praxis



Fraunhofer IRB ■ Verlag

bernhard remmers  
**Akademie**

## 4. Innendämmkongress

### Beiträge aus Wissenschaft und Praxis

Herausgeber:  
**Technische Universität Dresden**  
**Zentrum für Bauforschung – Institut für Bauklimatik**  
Prof. Dr.-Ing. John Grunewald

01062 Dresden  
Telefon +49 351 463 35259  
Telefax +49 351 463 32627  
URL [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_architektur/ibk](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_architektur/ibk)

**Der 4. Innendämmkongress in Dresden ist eine Veranstaltung  
der Bernhard Remmers Akademie.**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
[www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISSN: 2365-9084  
ISBN (Print): 978-3-8167-9975-7  
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9977-1

Redaktion: Jutta Gerdes  
Umschlaggestaltung: Martin Kjer  
Druck und Bindung: Bosch-Druck GmbH, Ergolding

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2017  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon +49 711 970-2500  
Telefax +49 711 970-2508  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
URL [www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## Einführung

Es gibt viele Gründe, sich für eine Innendämmung zu entscheiden. Oft sind es Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden, die baulich nicht zu verändern sind. Es können auch konstruktive Parameter, wie z. B. ein geringer Dachüberstand oder eine zu geringe Distanz zur Grundstücksgrenze dazu führen, eine Innendämmung zu wählen. Es kann auch sinnvoll sein, die Außenwände von der Raumluft thermisch abzukoppeln, um den Energieeinspareffekt zu erhöhen, indem man die Reduzierung der Transmissionswärmeströme durch intermittierenden Heizbetrieb unterstützt.

Innendämmung kann oft auch kostengünstiger und mit geringeren Beeinträchtigungen für die Nutzer während der Bauphase umgesetzt werden. Für alle diese Fälle gilt es, geeignete Sanierungslösungen zu finden, ohne die Funktion der Bestandskonstruktion zu beeinträchtigen. Auf der anderen Seite ist die Innendämmung bauphysikalisch anspruchsvoller. Fehler in Planung und Ausführung können dazu führen, dass Wärmebrücken, Schlagregen, Frost und Schimmel Probleme bereiten, die vermeidbar sind. Grundsätzlich sind Innendämmungen zuverlässig und sicher, wenn sie richtig ausgeführt werden. Die große Nachfrage nach Lösungen auf diesem Gebiet zeigt, dass Wissenstransfer weiterhin notwendig ist.

Aus diesem Grund findet zum vierten Mal der Innendämmkongress vom 19. bis 20. Mai 2017 in Dresden statt. Die Fachtagung ist organisiert vom Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden und der gemeinnützigen Bernhard Remmers Akademie, sowie in Kooperation mit dem Bundesverband für Altbauerneuerung (BAKA).

Zentrales Thema des Kongresses ist der Einsatz von Innendämmssystemen in vorbildlich durchgeführten Sanierungsprojekten sowohl in der Praxis als auch in Wissenschaft und Forschung. In 17 Vorträgen und in diesem Tagungsband werden gelungene Bauvorhaben wie auch Demonstrationsprojekte und Feldversuche vorgestellt. Informationen zum Stand der Normung, zu Fördermöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit geben nützliche Hinweise für eine sorgfältige Planung von Innendämmmaßnahmen. Vier Workshops ergänzen das Fachprogramm. Sie ermöglichen einen Einblick in die Simulationstools DELPHIN, Therakles und BIM HVAC und die Forschungstätigkeit im bauphysikalischen Labor des Institutes für Bauklimatik. Die begleitende Industrieausstellung vermittelt einen Überblick zu aktuell auf dem Markt erhältlichen Dämmssystemen und bietet eine gute Plattform zum intensiven Informationsaustausch und fachlichen Dialog.

Im vorliegenden Tagungsband – der erstmalig als Teil der IBK-Schriftenreihe im Fraunhofer IRB Verlag erscheint – sind die Beiträge der Referierenden in der Reihenfolge ihres Vortrages publiziert. Vielen Dank an alle Beteiligten, besonders an die Autorinnen und Autoren, für die Bereitstellung der Texte und die Genehmigung zur Veröffentlichung.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Tagung, anregende Gespräche und eine informative Lektüre.

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald  
Institut für Bauklimatik  
Zentrum für Bauforschung ZfBau,  
Technische Universität Dresden

Jutta Gerdes, Wolfgang Steurer  
Bernhard Remmers Akademie  
Geschäftsführung



## Inhaltsverzeichnis

Der Einsatz von Innendämmungen bei der Sanierung von Fachwerkhäusern am Beispiel Pölle 8 in Quedlinburg Christina Jerx	Seite 5
Regelwerksübersicht zum Wärme- und Feuchteschutz im Kontext der Innendämmung Gregor A. Scheffler, Ingenieurbüro Dr. Scheffler & Partner	Seite 15
Was bedeuten die Hinweise zur Innendämmung in der DIN 4108-3 für die Praxis? Hartwig M. Künzel, Fraunhofer IBP	Seite 32
Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 1) Folgen für die Vertragspraxis Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz	Seite 44
Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 2) Folgen für die Vertragspraxis Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz	Seite 49
Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 3) Folgen für die Vertragspraxis Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz	Seite 53
$A_w$ -Wert Messung in situ – Worauf ist bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten zu achten? Mario Stelzmann, HTWK Leipzig, TU Dresden Robin Berg, HTWK Leipzig Ulrich Möller, HTWK Leipzig John Grunewald, TU Dresden	Seite 58
Schadensfreie Hydrophobierung Jens Engel, Remmers GmbH	Seite 73
Fördermöglichkeiten bei der Denkmalsanierung Ulrich Schreiber, Staatministerium des Inneren – Freistaat Sachsen	Seite 79

Renditeoptimierung durch Energieberatung  
Stefan Preiß, Energieberatung Preiß

Seite 84

Fördermöglichkeiten für Innendämmung von Wohn- und Nichtwohngebäuden in Sachsen

Seite 98

Freia Frankenstein-Krug, Sächsische Energieagentur –  
SAENA GmbH

Nutzung bestehender Berechnungsmethodiken bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen (z. B. BNB)  
Uwe Kluge, Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH

Seite 104

Monitoring im „Alten Zöllnerviertel Weimar“  
Bauwerksperformance / Nutzerverhalten – ein Praxisbericht  
Andreas Söhnchen - Institut für Bauklimatik, TU Dresden  
Karin Rühling - Institut für Energietechnik, TU Dresden

Seite 107

Der Holzbalkenkopf im innengedämmten Außenmauerwerk-  
Erkenntnisse aus der Bauforschung in historischen Gebäuden  
Andrea Staar, Torsten Bark, Peter Strangfeld – BTU  
Cottbus-Senftenberg

Seite 119

Vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Innendämmssysteme in der Alten Schäfflerei Kloster Benediktbeuern  
Martin Krus, Stefan Bichlmair, Ralf Kilian, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Seite 129

Das bauphysikalische Forschungs- und Entwicklungslabor am Zentrum für Bauforschung der TU Dresden  
John Grunewald, Frank Meißner, Institut für Bauklimatik, TU Dresden

Seite 143

Simulationsgestütztes Monitoringsystem für städtische Innendämmungen in Erdnähe  
Hans Hafellner, TU Graz

Seite 157

# Der Einsatz von Innendämmungen bei der Sanierung von Fachwerkhäusern am Beispiel Pölle 8 in Quedlinburg

Christina Jerx

---

Eine Vielzahl von historischen Gebäuden ist aufgrund ihrer besonderen Fassadengestaltung nicht geeignet, mit außen angebrachten Wärmedämmungen energetisch aufgewertet zu werden.

So verlieren reich mit Stuck gestaltete Gründerzeit- oder Jugendstilgebäude ihre typische Fassadengestaltung, wenn diese mit von außen angebrachten Dämmebenen überformt würden. Sie verlören allesamt ihren Denkmalstatus.



**Abbildung 1:** Quedlinburg, Häuserensemble in der Word

Das trifft in gleichem Maße für die Vielzahl an Fachwerkhäusern zu, die die historischen Stadtkerne von vielen Städten wie Celle, Hameln, Wernigerode, Osterwieck und Quedlinburg prägen, um nur einige wenige zu nennen.

Ohne das fast unversehrte Ensemble der Altstadt mit seinen 1300 noch erhaltenen Fachwerkhäusern aus 6 Jahrhunderten um den Burgberg mit dem freiheitlichen Damenstift, das im Jahr 936 durch König Heinrich I. gegründet

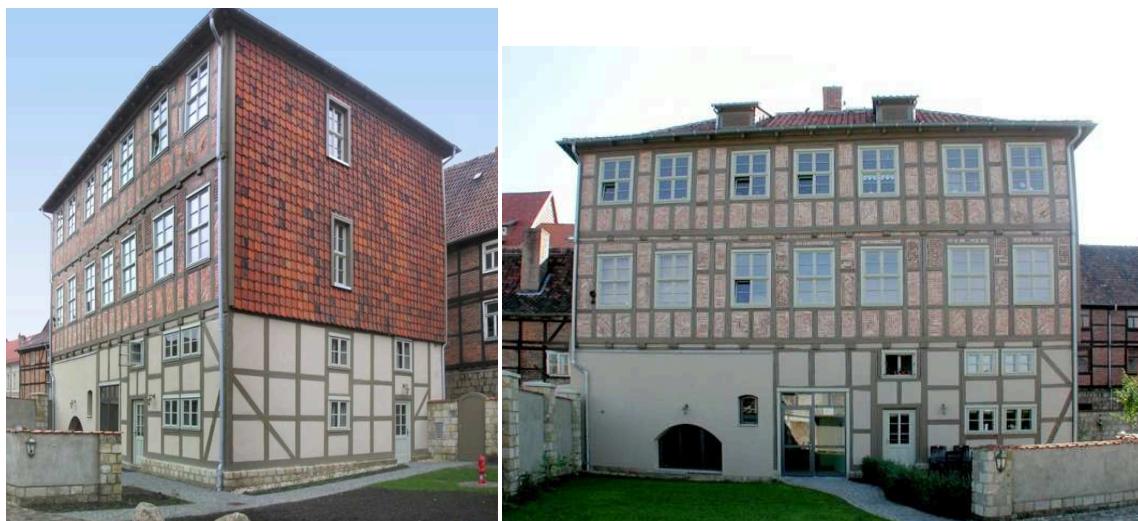
wurde und der romanischen Stiftskirche, hätte Quedlinburg wohl im Jahr 1994 nicht den Welterbe-Status von der Unesco erhalten.

Fachwerkhäuser, die aus der tragenden Holzkonstruktion (Schwellen, Ständer, Deckenbalken und Rähme) bestehen, die mit Lehm- oder Mauerwerksausfachungen und nur Lehmputen raumseitig ergänzt wurden, haben unter heutigen Nutzungsbedingungen keine ausreichende Wärmedämmung.

Damit würden durch den Einbau recht dichter Fenster und Türen und kontinuierlicher Beheizung dauerhafte Schäden an den Fachwerkholzern infolge von Kondensation auftreten. Dies führt letztendlich zum Verlust der Tragfähigkeit der Holzkonstruktion.

Bereits seit mehr als 15 Jahren wurden verschiedenste Untersuchungen an Fachwerkhäusern vorgenommen, um mit geeigneten Innendämmungen die genannte Problematik zu lösen.

In einem Pilotprojekt wurde 2003 bis 2004 an dem Fachwerkhaus Lange Gasse 7 in Quedlinburg der Einsatz von verschiedenen Innendämmungen realisiert und durch messtechnische Untersuchungen über einen Zeitraum von 3 Jahren vom Deutschen Fachwerkzentrum begleitet. Hierbei konnte das vielfältige Team von Fachingenieuren, Architekten und Baufirmen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauklimatik der TU-Dresden gut zusammenarbeiten und Erfahrungen, besonders auch im Umgang mit verschiedenen Baustoffen, sammeln.



**Abbildung 2:** Pilotprojekt Lange Gasse 7 in Quedlinburg

Unser Büro hat damals die Planungen zur Sanierung des barocken Fachwerkhauses durchgeführt und die Bauüberwachung übernommen, eine Herausforderung, die nicht nur Architekten und Fachingenieure betraf. Auch für die Bauausführenden waren Baustoffe und ihre Verarbeitung teilweise Neuland.

Seither haben alle am Bau Beteiligten Erfahrungen mit Innendämmungen, speziell auch bei Fachwerkhäusern, gesammelt.

Mit den bisher gesammelten Erfahrungen sollte dann Ende 2014 mit der Planung des Bürgerhauses Pölle 8 in Quedlinburg begonnen werden. Das ursprünglich in der Renaissance erbaute Fachwerkhaus stand zu diesem Zeitpunkt schon über 20 Jahre leer, war ungenutzt, wurde nicht instand gehalten und somit dem unvermeidlichen Verfall preisgegeben.



**Abbildung 3:** Straßenansicht Pölle 8 in Quedlinburg \_Bild: Frank Högg



**Abbildung 4:** Hofansicht Pölle 8 in Quedlinburg

Seit seiner Errichtung im Jahre 1552/53 hat das Haus mehrere Umbauphasen und bauliche Erweiterungen erlebt. So wurden bereits 1609/10 vier weitere Fachwerkachsen über einer Tordurchfahrt im Erdgeschoss angefügt. Hierbei wurden noch die Gestaltungsprinzipien der Renaissance und ihre Formensprache beibehalten. Zweistufige Saumschwellen mit Flechtbändern, Schiffskehlen, Taustäben und Tönnchenbalkenköpfen prägen die weit auskragenden Deckenebenen. Fußwinkelbohlen mit geschnitzten Sonnenrädern oder Palmrosen schaffen die Aussteifung in der Fassadenebene. Die Gefache wurden mit Holzgeflecht und Lehmputz ausgesetzt. Eine regelmäßige Reihung der meist unter 1,10 m hohen Fenster bildete die typische Fassadengestaltung. Genutzt wurde das Gebäude über die Jahrhunderte meist von Handwerkern, wie Tischler und Sattler.

Das ursprünglich nur 8m bis 9 m tiefe Haus über einem Sandsteingewölbe wurde wieder zu klein, so dass es zwischen dem Ende des 18. Jahrhunderts und Anfang des 19. Jahrhunderts um ein Drittel in den Hofraum erweitert wurde. Infolge musste eine neue Dachkonstruktion die 11m bis 16 m große Haustiefe überspannen. In dieser Umbauphase gingen viele Fassadendetails verloren. Im 19. und 20. Jahrhundert erfolgte im Erdgeschoss ein Umbau für ein Ladengeschäft mit Schaufenstern.

2014 sollte mit neuer Eigentümergemeinschaft ein neues Nutzungskonzept entwickelt und eine umfassende Sanierung der stark geschädigten Bausubstanz begonnen werden.

Da die Saumschwellen noch vollständig erhalten waren, Schnitzereidetails auf den Fachwerkstiegen von den Palmrosen zeugten und beim Entkernen noch 6 weitere Fußwinkelbohlen gefunden wurden, konnte mit den Denkmalbehörden und dem Sanierungsträger Einigkeit erzielt werden, die Renaissancefassade im Oberstock wieder zu vervollständigen.



**Abbildung 5:** Fußwinkelbohlen und geschädigte Schiffskehlen und Tönnchenbalken

Auch der neuen Nutzung mit einer Gaststätte im Erdgeschoss und in den Gewölbetonnen sowie der Einrichtung von 7 Ferienwohnungen im Oberstock und im Dachgeschoss stimmten die genehmigenden Behörden zu.

Nach umfangreichen Sicherungsmaßnahmen an der Fachwerktrag- und der Gewölbekonstruktion sowie der Verstärkung von Deckenbalken konnte mit der Ausmauerung der Gefache, dem Einbau neuer Deckenfüllungen und den Innendämmungen an allen Außenwänden begonnen werden.



**Abbildung 6:** Zweites Fachwerk für Aufnahme von Innendämmungen errichtet



**Abbildung 7:** Ausmauerung der äußeren Gefache

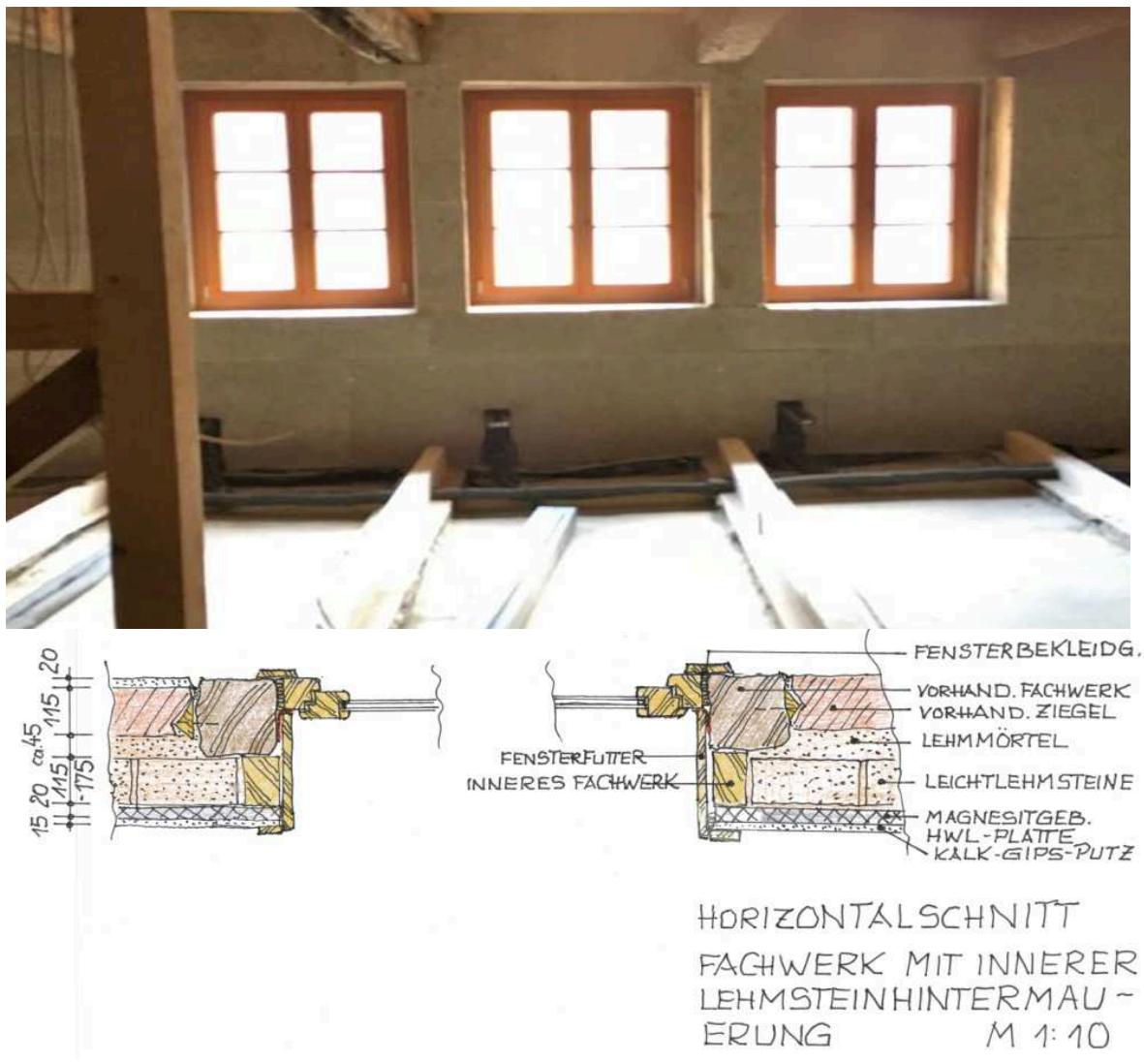
Aus den Erfahrungen bei der Sanierung der Langen Gasse 7 und anderen Fachwerkhäusern hat sich eine Hintermauerung mit Leichtlehmsteinen als effektivste Innendämmung herausgestellt. Die ungebrannten Lehmsteine vermauert mit einem Lehmmörtel bringen wenig Feuchtigkeit in den Wandaufbau. Sie müssen allerdings mit Entlastungshölzern, Sturz und Brüstungsriegeln und Beistiegen rechts und links der Fenster ausgestattet werden.



**Abbildung 8:** Lehmsteinausmauerung des inneren Fachwerkes

Dieses „2. Fachwerk“ kann fast immer auch als Verstärkung des Hauptfachwerkes mit betrachtet werden. Hohlräume zwischen der Ausmauerung der Gefache und der Lehmsteinhintermauerung werden mit dem halbtrockenen Lehmmörtel beim Ausmauern „ausgestopft“.

Als Putzträger wird eine 25mm dicke magnesitgebundene Holzwolleleichtbauplatte aufgedübelt und mit einem Kalkgipsputz- oder einem Lehmputz verputzt. Es sollten immer Holzfenster mit Innenfutter und Bekleidungen zum Einsatz kommen, um Rissbildungen in Leibungsbereichen abzudecken.



**Abbildung 9:** Holzwolleleichtbauplatte als Putzträger

Im Oberstock wurden die Fachwerkholzer innenseitig überputzt.



**Abbildung 10:** Außenwände raumseitig verputzt im Obergeschoss

Im Gaststättengeschoß wurde das innenseitige Fachwerk aus Althölzern bewusst sichtig belassen, um im Gastraum die Fachwerkoptik wirken zu lassen.



**Abbildung 11:** Inneres Fachwerk aus Altholz sichtbar im Gastraum

In allen Geschossen wurden Deckenbalken, Unterzüge und Stützen mit Kopfbändern sichtbar erhalten. Sie machen den Aufenthalt im Fachwerkdenkmal erlebbar.



**Abbildung 12:** Gastraum mit viel Fachwerk und Holzbauteilen



**Abbildung 13:** Komfortable Ferienwohnungen mit sichtbarem Fachwerk

Die so ertüchtigten Außenwände bieten einen U-Wert von 0,55 W/m<sup>2</sup>K bis 0,77 W/m<sup>2</sup>K und damit eine deutliche energetische Verbesserung der Wandkonstruktion.

Nach gut 1,5 Jahren Bauzeit konnte im August 2016 die Gaststätte öffnen und die 7 Ferienwohnungen von Touristen genutzt werden. Ausgestattet mit einer zentralen Brennwertheizungsanlage, komplett neuer Elektro- und Sanitärinstallation und einer Lüftungsanlage stehen Wohnungen unterschiedlicher Größe mit modernem Komfort zur Verfügung.



**Abbildung 14:** Rekonstruierte Fachwerkbrüstungen mit geschnitzten Fußwinkelbohlen



**Abbildung 15:** Sanierte Fachwerkfassade zur Straße



**Abbildung 16:** Sanierte Hoffassade

# Regelwerksübersicht zum Wärme- und Feuchteschutz im Kontext der Innendämmung

Dr.-Ing. Gregor A. Scheffler,  
Ingenieurbüro Dr. Scheffler & Partner GmbH ([www.ib-scheffler.de](http://www.ib-scheffler.de))

## 1 Einleitung

Zum Zweck der Energiebedarfsreduktion sowie zur Verbesserung des Mindestwärmeschutzes und der Behaglichkeit werden häufig Maßnahmen zur Wärmedämmung vorgesehen. Viele Bestandsgebäude lassen dabei aufgrund gestalterischer, denkmalpflegerischer oder auch wirtschaftlicher Aspekte nur eine Innendämmung zu (z.B. „Abbildung 1“). Sie ist dann die einzige sinnvolle Möglichkeit, den hygienischen und energetischen Anforderungen wirksam und nachhaltig zu begegnen.



**Abbildung 1** Gebäudebeispiele bei denen eine thermische Ertüchtigung der Außenwände nur von innen erfolgen kann

Da der Einbau einer Innendämmung eine Reihe bauphysikalischer Veränderungen nach sich zieht, bedarf sie der bauphysikalischen Planung und entsprechender Sorgfalt bei der Ausführung. Der vorliegende Beitrag skizziert die bauphysikalischen Aspekte, denen bei der Planung und Ausführung von Innendämmungen Beachtung geschenkt werden muss. Das für die Nachweisführung relevante Regelwerk wird dabei vorgestellt und zugeordnet. Es wird zwischen Aspekten des Wärmeschutzes und des Feuchteschutzes differenziert.

## 2 Bauphysikalische Einordnung

Eine Innendämmung verändert die hygrothermischen Verhältnisse im Wandquerschnitt im Vergleich zu einer ungedämmten Konstruktion. Das beeinflusst:

1. Die winterliche Dampfdiffusion (Feuchte von innen)
2. Das Austrocknungsverhalten (Feuchte von außen)
3. Den Wärmeabfluss im Bereich der Bauteilanschlüsse (Wärmebrücken)

Diesen Aspekten wird im Regelwerk durch entsprechende Anforderungen und Nachweise Rechnung getragen. Sie werden zunächst bauphysikalisch kurz erläutert.

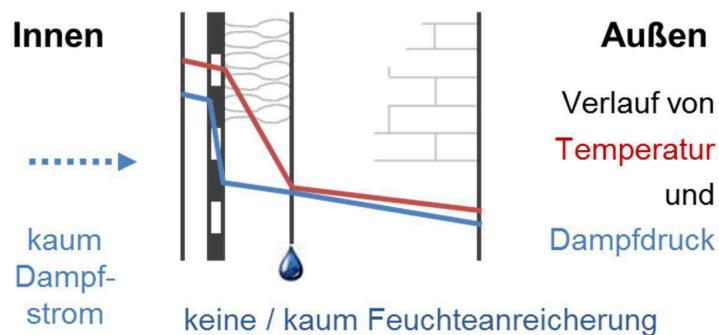
### 2.1. Feuchte von innen - Dampfdiffusion

Eine wesentliche Veränderung infolge von Innendämmung ist der deutliche Temperaturabfall innerhalb der innenliegenden Wandschichten. Dieser Temperaturabfall begünstigt die Dampfdiffusion in die Konstruktion hinein. Innendämmssysteme müssen deshalb entweder diesen Diffusionsstrom unterbinden, oder in der Lage sein, die eindringende Feuchtigkeit abzupuffern.

Zum Umgang mit der winterlichen Dampfdiffusion gibt es bei den Innendämmssystemen zwei verschiedene Prinzipien:

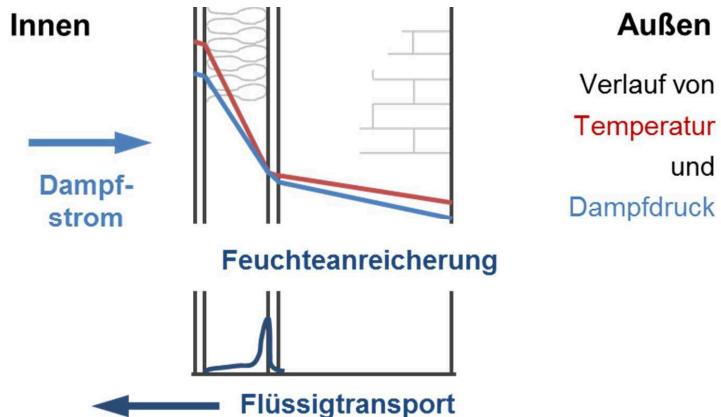
- Diffusionsbremsend
- Diffusionsoffen + kapillaraktiv

Diffusionsbremsende Systeme, wie beispielsweise Faserdämmstoffe mit Dampfbremsschicht oder diffusionshemmende Kunststoffschäume, begrenzen - je nach Diffusionswiderstand des Systems - den Dampfdiffusionsstrom in die Wand hinein. Das bauphysikalische Prinzip ist in Abbildung 2 illustriert.



**Abbildung 2** Funktionsweise der diffusionsbremsenden Innendämmung: Der Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein wird durch den Diffusionswiderstand der Dämmung oder einer Trennschicht reduziert bzw. unterbunden.

Die bauphysikalischen Eigenschaften der Systemkomponenten sind so aufeinander abgestimmt, dass der verbleibende Feuchteintrag vom System oder der Bestandskonstruktion aufgenommen und im Sommer wieder abgegeben werden kann. Aufgrund des erforderlichen Diffusionswiderstandes begrenzen die Systeme jedoch auch die Austrocknung nach innen.



**Abbildung 3** Funktionsweise einer diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung: Der Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein wird zugelassen. Die Feuchtigkeit lagert sich im Dämmstoff an (Sorption) und wird in flüssiger Form (kapillar) zurück in Richtung raumseitige Oberfläche transportiert. Das Feuchteniveau wird dadurch gering gehalten.

„Abbildung 3“ zeigt eine Illustration des Wirkprinzips diffusionsoffener, sogenannter kapillaraktiver Innendämmssysteme. Sie erlauben den winterlichen Dampfdiffusionsstrom in die Wand hinein, nehmen die anfallende Feuchtigkeit auf und transportieren sie ab einem gewissen Feuchtegehalt in flüssiger Form in Richtung Innenoberfläche zurück. Dadurch wird das Feuchteniveau in der Wand dauerhaft auf ein unkritisches Maß reduziert. Gleichzeitig bleibt die Wand diffusionsoffen. Sie ermöglicht dadurch das Abpuffern von Feuchtespitzen aus der Raumluft und die Austrocknung von Feuchtigkeit aus der Bestandskonstruktion nach innen.

## 2.2. Feuchte von außen - Schlagregeneinfluss

Wird eine Wand von innen gedämmt, erhöht sich auch ihre Sensitivität gegenüber der äußeren Schlagregenbelastung. Als Folge der Innendämmung ist die Bestandswand im Winter deutlich kälter als früher. Damit wird das Trocknungspotential reduziert („Abbildung 4“). Zudem kann die Wand auch nach innen weniger austrocknen, da zusätzliche Schichten auf der Innenseite auch einen zusätzlichen Diffusionswiderstand bewirken (in Abhängigkeit vom gewählten Innendämmssystem).

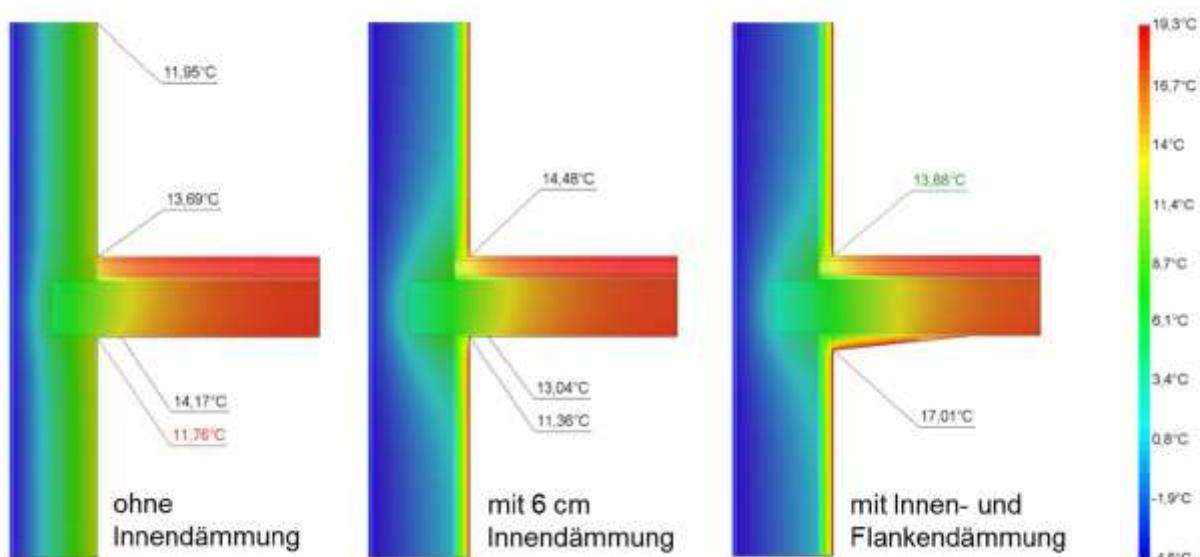


**Abbildung 4** Auswirkung der Innendämmung auf eine Sichtmauerwerkskonstruktion in Bezug auf die Schlagregenaufnahme und das Austrocknungsvermögen

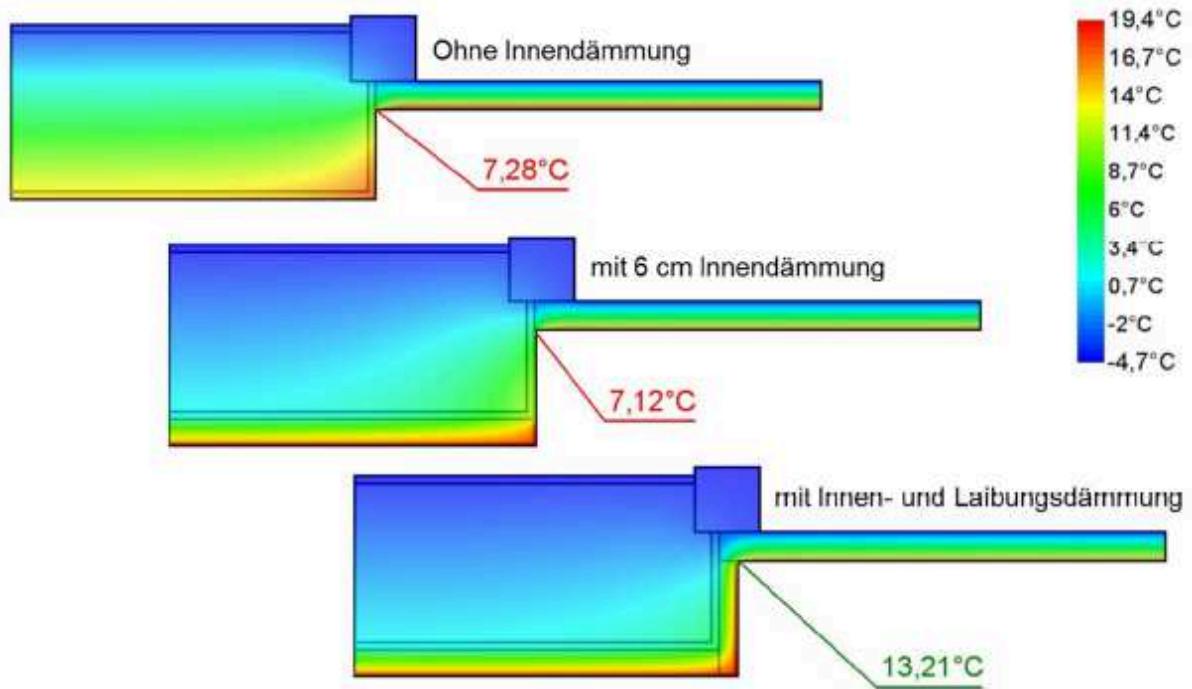
## 2.3. Mindestwärmeschutz und Wärmebrücken bei Innendämmung

Durch Anbringen einer Innendämmung wird der Wärmeabfluss über die gedämmte Außenwand reduziert. In Anschlussbereichen wie Fenstern oder einbindenden Wänden und Decken – also den klassischen Wärmebrücken – führt das jedoch dazu, dass die Oberflächentemperaturen hier mit Innendämmung häufig niedriger sind, da die Wärmezufuhr aus der jetzt gedämmten Außenwandoberfläche geringer ausfällt („Abbildung 5“, „Abbildung 6“). Dadurch kann es, wenn keine flankierenden Maßnahmen im Bereich der Wärmebrücken vorgesehen werden, nach Einbau einer Innendämmung zu Schimmelproblemen kommen, ohne dass es vorher derartige Probleme gab – vor allem, wenn parallel der Einbau neuer Fenster erfolgt.

Zur Vermeidung eines Schimmelproblems müssen die Wärmebrückendetails mit Hilfe flankierender Wärmedämmung thermisch ertüchtigt werden. Die entsprechenden Maßnahmen können mit Hilfe von Wärmebrückeberechnungen dimensioniert und optimiert werden. Im Bereich der in die Außenwandkonstruktion einbindenden Wände und Decken sind hierfür in der Regel Flankendämmungen mit Dämmplatten oder Dämmkeilen im Anschlussbereich der einbindenden Bauteile erforderlich, siehe „Abbildung 5“ rechts. Bei Fensteranschlüssen ist zumeist eine Laibungsdämmung vorzusehen („Abbildung 6“).



**Abbildung 5** Vergleich der Wärmebrückeberechnungen für das Konstruktionsdetail einer in die Außenwand einbindenden Geschossdecke ohne Innendämmung, mit Innendämmung sowie mit Innendämmung und Flankendämmung.



**Abbildung 6** Vergleich der Wärmebrückenberechnungen für das Konstruktionsdetail einer Fensterlaibung ohne Innendämmung, mit Innendämmung sowie mit Innen- und Laibungsdämmung.

### 3. Regelwerk zum Wärme- und Feuchteschutz

#### 3.1. Gesetzliche Regelungen

##### 3.1.1 EnEV

Die Energieeinsparverordnung (EnEV, aktuell die EnEV 2014 [7]) regelt die energetischen Anforderungen an Gebäude bei Neubau und Sanierung. Die formulierten Anforderungen und die in Bezug genommenen Berechnungsverfahren bestimmen die energetische Bilanzierung von Gebäuden für Deutschland.

In Bezug auf die Innendämmung stellt die EnEV 2014 keine bauteilspezifischen Anforderungen mehr. Der in früheren Ausgaben der EnEV benannte Anforderungswert von  $U_{\max, \text{ID}} \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ist in der aktuell gültigen Fassung nicht mehr zu finden. Damit ist das Anbringen einer Innendämmung keine EnEV-relevanten Bauteilveränderung mehr. Auch der Referentenentwurf des Gebäudeenergiegesetzes (GEG [8]) als Zusammenlegung von EnEV und EEWärmeG sieht an dieser Stelle keine Veränderung / Verschärfung vor.

Die Innendämmstärke kann damit nach der energetischen Ambition des Bauherrn und nach bauphysikalischen Kriterien festgelegt werden.

## 3.2. Nationale und internationale Normen

### 3.2.1 DIN 4108-2

DIN 4108-2 [1] regelt u.a. den Mindestwärmeschutz von Gebäuden. Sie ist bauaufsichtlich eingeführt und damit verbindlich anzuwenden. In Bezug auf den Mindestwärmeschutz werden in der Norm Anforderungen an die thermische Mindestqualität der Bauteile und auch der Bauteilanschlüsse gestellt. Ziel dabei ist, Tauwasserausfall und Schimmelbildung auf den Bauteiloberflächen sicher auszuschließen und ein Mindestmaß an thermischer Behaglichkeit zu garantieren. Niedrige Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen führen einerseits dazu, dass sich Personen unbehaglich fühlen. Andererseits kühlst sich die Raumluft im Bereich der kalten Oberflächen ab, was zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte führt. In deren Folge kann es zu Bedingungen kommen, bei denen Schimmelwachstum möglich ist, oder sich sogar Wasser in Form von Kondensat niederschlägt.

Für flächige Bauteile gibt die Norm Mindestwerte für die Wärmedurchlasswiderstände an. Für Außenwände ist hier ein Mindestwärmedurchlasswiderstand von  $1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$  anzusetzen. Rechnet man dies in den Wärmedurchgangskoeffizienten um, muss mit Hilfe der Innendämmung mindestens ein U-Wert von  $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden.

Zur Sicherstellung der Schimmelfreiheit im Bereich von Bauteilanschlüssen sieht die Norm Wärmebrückenberechnungen nach DIN EN ISO 10211 vor. In deren Ergebnis steht die stationäre Temperaturverteilung, wie z.B. in „Abbildung 5“. Als Kriterium für die Einhaltung des Mindestwärmeschutzes wird die innere Oberflächentemperatur an der kältesten Stelle herangezogen. Das in diesem Kontext normativ verwendete Kriterium ist der Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$  mit  $f_{Rsi} \geq 0,7$

$$f_{Rsi} = (\theta_{si} - \theta_e) / (\theta_i - \theta_e)$$

Der Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$  ist definiert als das Verhältnis aus der Differenz von Innenoberflächen- und Außentemperatur zur Differenz von Innen- und Außentemperatur. Unter den genannten Bedingungen der Norm (DIN 4108-2) ergibt eine raumseitige Oberflächentemperatur von  $12,6^\circ\text{C}$  den Oberflächentemperaturfaktor von  $f_{Rsi} = 0,7$ .

Die Bemessungsgrundlage für das Schimmelwachstum ist eine Raumluftfeuchte von 50 % bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Wird diese Luft auf  $12,6^\circ\text{C}$  abgekühlt, werden gerade 80 % rel. Luftfeuchte erreicht. Oberhalb von 80 % rel. Luftfeuchte kann Schimmelwachstum auf baulichen Oberflächen nicht mehr sicher ausgeschlossen werden.

DIN 4108-2 ist für die Planung von Innendämmungen eine sehr wichtige Norm. Zum einen kann für viele Bestandskonstruktionen nur mithilfe einer Innendämmung der Mindestwärmeschutz hergestellt werden. Zum anderen müssen insbesondere bei innengedämmten Konstruktionen die Anschlussdetails

hinsichtlich der Schimmelfreiheit bewertet werden. Für beides definiert die Norm Anforderungen und gibt den Rahmen für die Nachweisführung vor.

### 3.2.2 DIN 4108-3

DIN 4108-3 [2] regelt den klimabedingten Feuchteschutz von Gebäuden. Auch diese Norm ist bauaufsichtlich eingeführt und ihre Anwendung damit verbindlich.

Die Anforderungen an den Feuchteschutz unterscheiden zwischen der Vermeidung kritischer Feuchte innerhalb von Bauteilen als Folge von Dampfdiffusionsvorgängen und dem Schlagregenschutz von Wänden. Für beide Einflüsse ist DIN 4108-3 das grundlegende Regelwerk in Deutschland und damit die zentrale Norm für den Feuchteschutz auch von Innendämmungen. Hier ist u.a. das Gläserverfahren zur Dampfdiffusionsberechnung verankert und gleichzeitig der Weg eröffnet, darüber hinaus genauere Bemessungsverfahren anzuwenden. Die Regelungen der DIN 4108-3 werden in einem eigenen Beitrag [19] detaillierter vorgestellt und diskutiert. Deshalb wird hier nur auf die Grundzüge der Nachweisführung eingegangen. Es wird zwischen der Dampfdiffusion (Feuchte von innen) und dem Schlagregenschutz (Feuchte von außen) unterschieden.

#### Dampfdiffusion

Der Nachweis zur Begrenzung des Tauwasseranfalls innerhalb der Konstruktion (Dampfdiffusionsnachweis) ist gemäß DIN 4108-3 dreistufig aufgebaut. Für sogenannte nachweisfreie Konstruktionen, die erste Stufe der Nachweisführung, kann er entfallen. Dafür müssen bestimmte Kriterien eingehalten werden. In Bezug zur Innendämmung ist das die Begrenzung des innen aufzubringenden thermischen Widerstandes auf  $R \leq 1,0 \text{ m}^2 \text{K/W}$  bei gleichzeitigem Diffusionswiderstand der inneren Schichten von  $s_d \geq 0,5 \text{ m}$ .

Für davon abweichende Innendämmungen kann der Dampfdiffusionsnachweis rechnerisch mithilfe des Periodenbilanzverfahrens erbracht werden (zweite Stufe). Dabei wird mit stationären Dampfdiffusionsberechnungen nach Gläser in zwei Schritten ermittelt, wie viel Wasser während einer Winterperiode innerhalb der Konstruktion anfällt (Tauwassermenge) und wie viel in einer Sommerperiode wieder verdunsten kann (Trocknungsmenge). Die Trocknungsmenge muss dabei die Tauwassermenge übersteigen bei gleichzeitiger Begrenzung der Tauwassermengen auf  $1 \text{ kg/m}^2$  bzw. bei Kondensat im Bereich nicht feuchtaufnahmefähiger Schichten auf  $0,5 \text{ kg/m}^2$ .

Das Gläserverfahren ist ein vereinfachtes Rechenverfahren, das nur Wärmeleitung und Dampfdiffusion und nur stationäre, d.h. konstante klimatische Randbedingungen berücksichtigt. Dadurch kann mit dem Gläserverfahren nur der Nachweis gegenüber einer Feuchtebelastung von innen (Dampfdiffusion) und dies nur für Konstruktionen, bei denen feuchtetechnisch auch nur die Dampfdiffusion relevant ist, geführt werden. Für Konstruktionen, bei deren Funktionsweise der Flüssigtransport eine wichtige Rolle spielt (kapillaraktive Innendämmssysteme, schlagregensensitive Konstruktionen), kann der Nachweis mit Hilfe des Gläserverfahrens nicht erbracht werden. Hier müssen numerische Simulationsverfahren angewendet werden (vollständiger Feuchtenachweis als

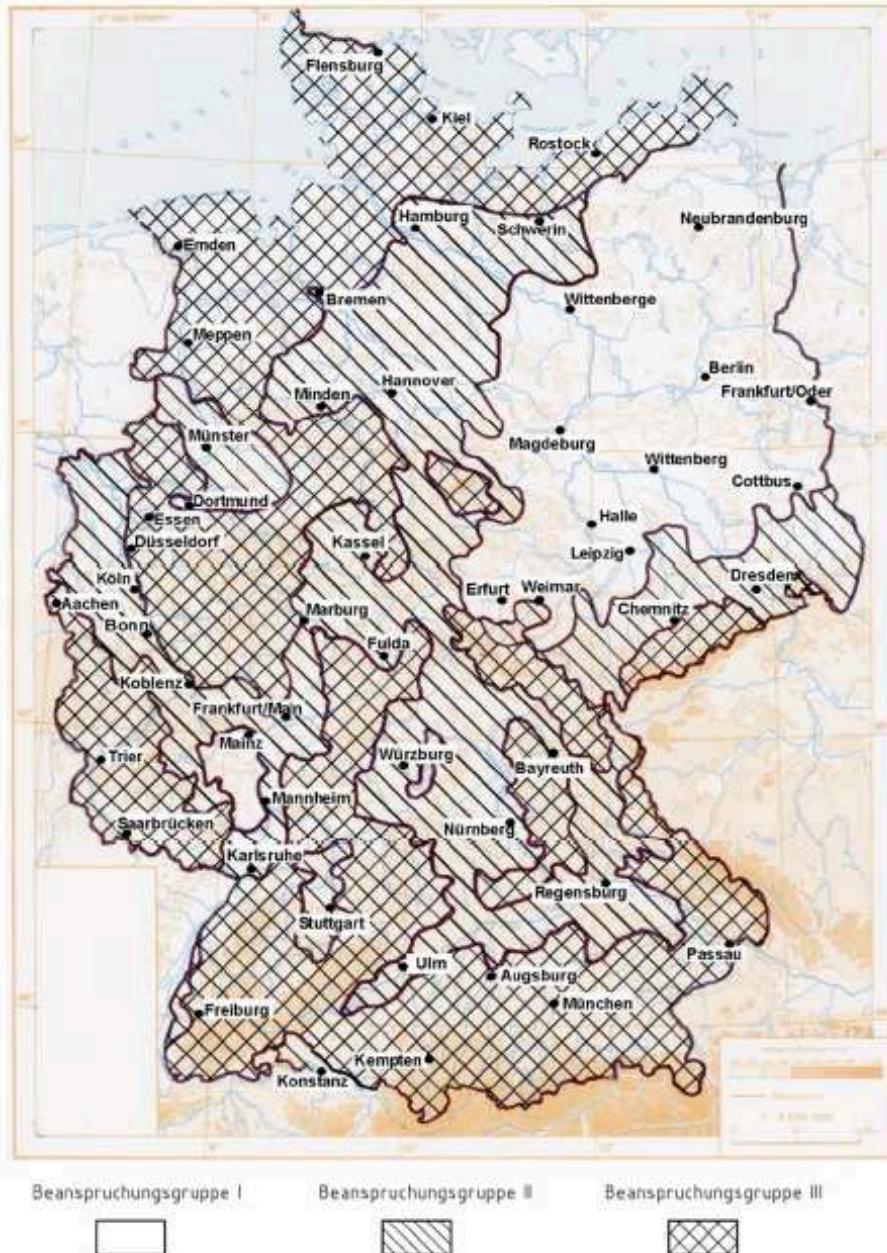
dritte Stufe der Nachweisführung). DIN 4108-3 lässt derartige Verfahren zu und nimmt entsprechende Regelungen mit der DIN EN 15026 in Bezug.

### **Schlagregen**

Das Thema Schlagregen wird unterteilt in die Schlagregenbelastung und den Schlagregenschutz einer Konstruktion. Zur Grobabschätzung der Schlagregenbelastung wurden die Regionen Deutschlands drei Beanspruchungsgruppen zugeteilt. Die Grobzuordnung kann anhand der Schlagregenkarte der Norm erfolgen („Abbildung 7“). Entscheidend ist jedoch jeweils die konkrete Schlagregenbelastung am Gebäude bzw. der innen zu dämmenden Fassaden. Diese ergibt sich zusätzlich aus der Fassadenexposition sowie den lokalen Klimaverhältnissen, die vor Ort am Gebäude geprüft und ermittelt werden müssen.

Auf der anderen Seite steht der Schlagregenschutz der innen zu dämmenden Wände. Dieser ist in Abhängigkeit der vorhandenen Schlagregenbelastung ebenfalls zu planen. Wird die Fassade erneuert, können Putz- und Anstrichsysteme mit entsprechendem Schlagregenschutz vorgesehen werden. DIN 4108-3 gibt hierfür in Abhängigkeit von der Schlagregenbeanspruchungsgruppe Planungsparameter an die Hand.

Wird die Fassade nicht erneuert oder können aufgrund denkmalpflegerischer Aspekte keine Veränderungen an der Fassade vorgenommen werden, muss der vorhandene Schlagregenschutz detaillierter bewertet und in die Planung und Bemessung der Innendämmung einbezogen werden. Die Norm lässt die konkrete Nachweisführung offen und verweist auf die WTA-Merkblätter 6-4 und 6-5 sowie die hygrothermische Simulation.



**Abbildung 7** Übersichtskarte zur Schlagregenbeanspruchung in der Bundesrepublik Deutschland gemäß DIN 4108-3:2014-11 (Bild 11/S. 28)

### 3.2.3 DIN EN ISO 13788

DIN EN ISO 13788 [6] regelt als internationale Norm den Mindestwärmeschutz zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und die Begrenzung des Tauwasserausfalls innerhalb der Konstruktion. Sie deckt damit inhaltliche Teilbereiche sowohl von DIN 4108-2 (Mindestwärmeschutz, Tauwasserfreiheit der Oberflächen), als auch von DIN 4108-3 (Begrenzung des Tauwasseranfalls innerhalb der Konstruktion) ab. Der Feuchteschutz von außen (Schlagregen) wird hier nicht betrachtet. Das bezüglich der Dampfdiffusion zugrunde gelegte Verfahren ist identisch mit dem in DIN 4108-3 beschriebenen Verfahren. Es gibt lediglich einige kleinere Unterschiede hinsichtlich der Randbedingungen und der Bewertung.

### **3.2.4 DIN EN 15026**

DIN EN 15026 [3] regelt die hygrothermische Bewertung mithilfe numerischer Simulationsverfahren. Hier sind die grundlegenden physikalischen Methoden zur Beschreibung der Transportprozesse und der erforderlichen Materialeigenschaften festgehalten. Das generelle Vorgehen zur Ermittlung der Berechnungsrandbedingungen wird beschrieben und es werden Empfehlungen beispielsweise für den Ansatz des Innenklimas in Abhängigkeit vom Außenklima gegeben. Die Norm definiert den internationalen Mindeststandard in Bezug auf die hygrothermische Bauteilsimulation, der in den einschlägigen Berechnungswerkzeugen umgesetzt ist.

## **3.3. WTA-Merkblätter**

Die Abkürzung WTA steht für Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Die WTA ist ein gemeinnütziger Verein, der sich zum Ziel gesetzt hat, die Forschung und deren praktische Anwendung wie auch Verbreitung auf den Gebieten der Bauwerkserhaltung, der Bauinstandsetzung und der Denkmalpflege zu fördern. Eine zentrale Rolle spielen dabei die WTA-Merkblätter, die in verschiedenen Fachbereichen (Referaten) zu verschiedenen Fachthemen erarbeitet werden und in der Praxis seit vielen Jahren anerkannte Planungs- und Anwendungshilfe sind.<sup>1</sup>

Auch zur Innendämmung und den verwandten bauphysikalischen Themen hat die WTA eine Reihe von Merkblättern erarbeitet. Die wichtigsten davon werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### **3.3.1 WTA-Merkblätter 6-1 und 6-2**

Die WTA-Merkblätter 6-1 [9] und 6-2 [10] beschäftigen sich mit der numerischen Simulation des Wärme- und Feuchtetransportes.

WTA-Merkblatt 6-1 ist ein Leitfaden für den Anwender hygrothermischer Simulationsverfahren. Ausgehend von der Definition der Fragestellung, die mithilfe der Simulationsberechnung beantwortet werden soll, wird das notwendige Vorgehen Schritt für Schritt erläutert. Das Merkblatt gibt einen gut verständlichen Überblick und Einstieg in die Anwendung von hygrothermischen Simulationsverfahren.

WTA-Merkblatt 6-2 regelt die der hygrothermischen Simulation zugrunde gelegten Verfahren. Ausgehend von der Modellierung der Speicher- und Transportprozesse werden die theoretischen Grundlagen beschrieben, Hinweise zu Bestimmung und Ableitung der Materialeigenschaften für die Simulation gegeben, Rand- und Anfangsbedingungen definiert, Anforderungen und Vergleichskriterien für die Beurteilung der numerischen Qualität der Verfahren formuliert und Grundsätze zu Bewertung und Dokumentation der Berechnungsergebnisse angegeben. Das

---

<sup>1</sup> Für weitere Informationen siehe [www.wta.de](http://www.wta.de).

Merkblatt war in der Fassung von 2001 die Grundlage für die Erarbeitung von DIN EN 15026. In der aktuellen Fassung bildet es den Stand der Technik für die hygrothermische Simulation ab und geht damit über die Inhalte der DIN EN 15026 hinaus. Zudem spiegelt es den Modellumfang der im deutschen Sprachraum einschlägig angewandten Simulationswerkzeuge wider.

### **3.3.2 WTA-Merkblatt 6-3**

WTA-Merkblatt 6-3 [11] dokumentiert die Grundsätze für die Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos auf Grundlage hygrothermischer Mess- oder Simulationsdaten. Die biologischen Zusammenhänge für das Schimmelpilzwachstum werden im bauphysikalischen Kontext beleuchtet. Zudem wird ein Schimmel-Prognosemodell für die hygrothermische Simulation formuliert. Im Kontext der Innendämmung bietet das Merkblatt zum einen den Einstieg in ein besseres Verständnis der für das Schimmelpilzwachstum relevanten Einflussparameter. Zum anderen kann es als Grundlage einer über die normativen Mindestwärmeschutzanforderungen hinausgehenden Einzelbewertung angewandt werden.

Das Merkblatt aus dem Jahr 2005 ist derzeit in Überarbeitung.

### **3.3.3 WTA-Merkblatt 6-4**

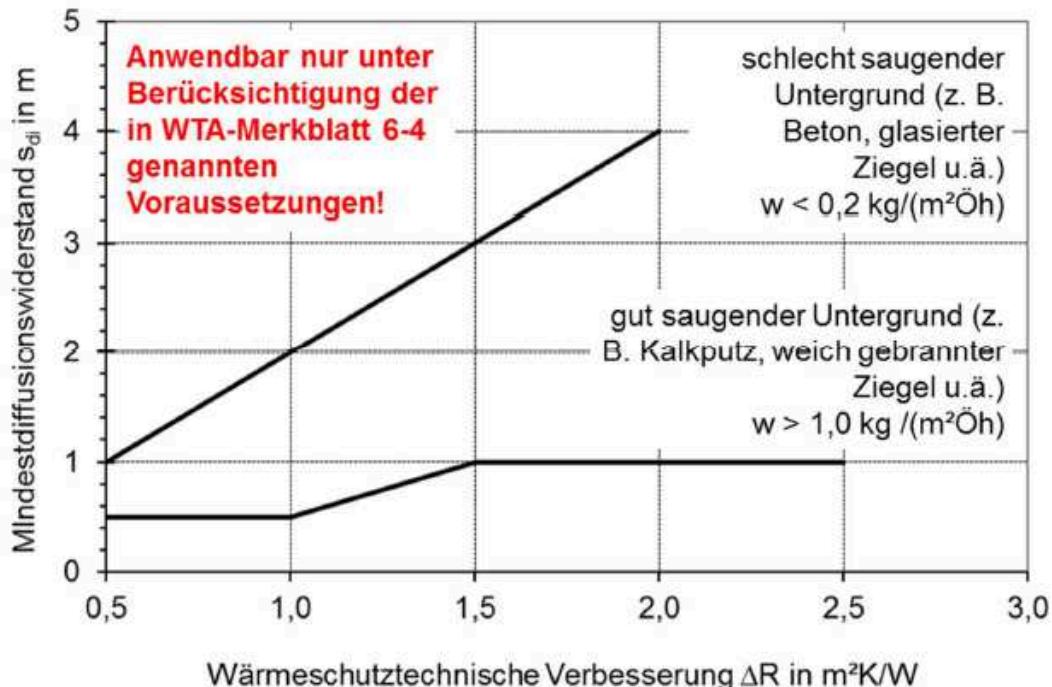
Das WTA-Merkblatt 6-4 [12] gibt grundsätzliche Planungshilfen für die Innendämmung. Die bauphysikalischen Aspekte werden verständlich in komprimierter Form erläutert und konkrete Hinweise für die Nachweisführung gegeben.

WTA-Merkblatt 6-4 stellt ein vereinfachtes Nachweisverfahren zur Dampfdiffusion vor, das den Bereich der nachweisfreien Konstruktionen gemäß DIN 4108-3 erweitert. Als Einflussparameter werden der Wasseraufnahmekoeffizient ( $w$ -Wert) des zu dämmenden Untergrundes als Maß für dessen kapillare Leitfähigkeit sowie der Wärmedurchlasswiderstand  $\Delta R$  und der Diffusionswiderstand  $s_{di}$ , der mit der Innendämmung sowie gegebenenfalls zusätzlichen Funktions- und Bekleidungsschichten eingebracht werden soll, betrachtet. Die entsprechenden Zusammenhänge sind im Merkblatt in einem Diagramm zusammengefasst („Abbildung 8“).

Da der Herleitung des Diagramms bestimmte Randbedingungen zugrunde liegen, müssen die im Merkblatt genannten Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Diagramms gegeben sein. Diese sind:

- Kein Feuchteintrag aus Schlagregen (konstruktiver Schlagregenschutz, wasserabweisender Putz)
- Bestandskonstruktion erfüllt früheren Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 ( $R \geq 0,39 \text{ m}^2\text{K/W}$ )
- Innenklima entspricht normaler Feuchtelast gemäß WTA-Merkblatt 6-2
- Mittlere Jahrestemperatur des Außenklimas  $\geq 7^\circ\text{C}$

- Maximale Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstands infolge Innendämmung  $\Delta R \leq 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  (gut saugfähiger Untergrund) bzw.  $\leq 2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$  (schlecht saugende Untergründe)



**Abbildung 8** Mindestens einzuhaltender Diffusionswiderstand  $s_{di}$  des mit der Innendämmung eingebrachten Aufbaus (Dämmung und ggf. weitere Schichten) in Abhängigkeit vom thermischen Widerstand der geplanten Dämmung sowie dem w-Wert des Untergrundes gemäß WTA-Merkblatt 6-4

Das WTA-Merkblatt 6-4 ist ein zentrales Regelwerk für die Planung und Anwendung von Innendämmungen und wendet sich an Architekten, Fachplaner, Bauherrn und Ausführende gleichermaßen. Das Merkblatt wurde überarbeitet und liegt seit Ende 2016 in der aktualisierten Fassung vor.

### 3.3.4 WTA-Merkblatt 6-5

Das WTA-Merkblatt 6-5 [13] schließt die Lücke zwischen den grundsätzlichen bauphysikalischen Aspekten der Innendämmung und deren Bewertung mithilfe der einfachen Verfahren einerseits (z.B. gemäß DIN 4108-3, WTA-Merkblatt 6-4) und der Anwendung numerischer Berechnungsverfahren andererseits (z.B. gemäß DIN EN 15026 bzw. WTA-Merkblatt 6-2). Es beschreibt das konkrete Vorgehen für den hygrothermischen Detailnachweis in Bezug auf die Innendämmung. Zudem gibt das WTA-Merkblatt 6-5 für die Auswertung folgende Bewertungskriterien an, die verwendet werden können, sofern keine abweichenden Anforderungen bestehen:

- Der eingeschwungene Zustand muss erreicht sein
- Für möglicherweise nicht frostbeständige Materialien sollte ein Sättigungsgrad von 30 % nicht überschritten werden. Der Sättigungsgrad ist das Verhältnis des vorhandenen Wassergehalts zur Porosität. Diesem Grenzwert liegt ein Sicherheitsfaktor von 2 bezogen auf kritische Sättigungsgrade zugrunde.

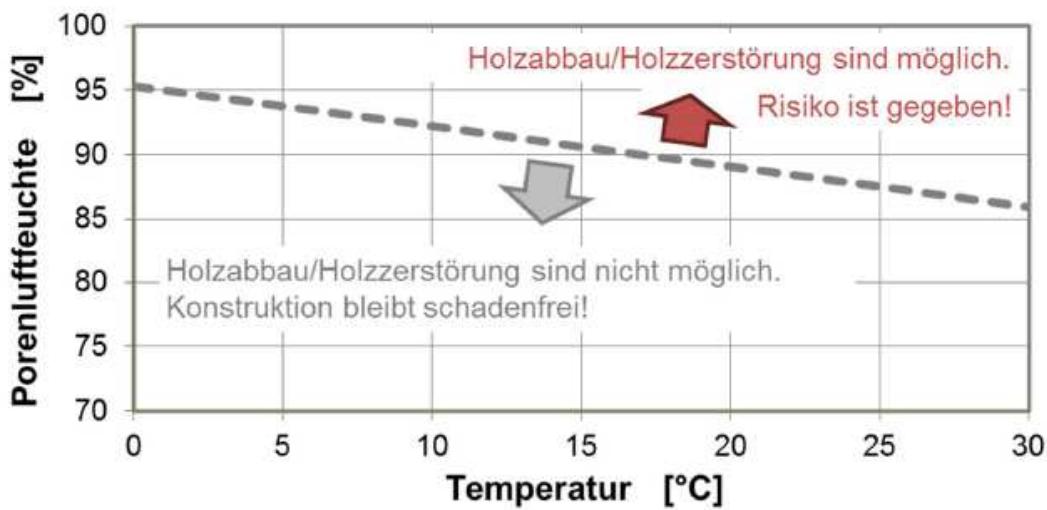
Höhere Sättigungsgrade sind zulässig, sofern die relative Luftfeuchte innerhalb der Materialschicht unter 95 % bleibt.

- Hinsichtlich der Festigkeit sollte bei gipshaltigen Untergründen eine Gleichgewichtsfeuchte von 95 % relative Feuchte nicht überschritten werden.
- Die relative Porenluftfeuchte in Holzbauteilen darf 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C im Tagesmittel nicht überschreiten. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Langfristig sollten im Jahresverlauf 85 % relative Luftfeuchte nicht überschritten werden. Siehe dazu auch WTA-Merkblatt 6-8.
- Hinsichtlich der inneren Bauteiloberflächen muss Schimmelpilzfreiheit gewährleistet sein (siehe WTA-Merkblatt 6-3). Dies gilt insbesondere, wenn der Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$  kleiner als 0,7 ist.

Damit stellt dieses Merkblatt die wesentliche Arbeitsgrundlage für die hygrothermische Nachweisführung von Innendämmungen mithilfe numerischer Simulationsverfahren dar.

### 3.3.5 WTA-Merkblatt 6-8

Das 2016 erschienene WTA-Merkblatt 6-8 [14] enthält Regelungen zur feuchtetechnischen Beurteilung von Holzbauteilen. Neben spezifischen Angaben zur Anwendung verschiedener Berechnungsverfahren für die hygrothermische Bewertung von Holzbauteilen werden Kriterien für die Bewertung der Berechnungsergebnisse formuliert.



**Abbildung 9** Kriterium zur Auswertung von Temperatur und relativer Luftfeuchte bezüglich des Risikos der Holzzerstörung nach WTA-Merkblatt 6-8 [14]. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Grenzwertkurve, unterhalb derer eine Holzzerstörung sicher ausgeschlossen ist.

Der Zusammenhang der genannten Grenzwerte zur Beurteilung von Holzbauteilen ist in „Abbildung 9“ dargestellt. In Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte bzw. der Holzfeuchte kann demnach eine Grenzwertlinie abgeleitet werden, unterhalb derer eine Holzzerstörung ausgeschlossen ist. Diese Grenzwertlinie nach [17] und [18] geht auf die Auswertung von Forschungsergebnissen zur feuchtebedingten Holzzerstörung zurück [21]. Als Bemessungskriterium angewendet erlaubt sie eine deutlich genauere

Berücksichtigung der relevanten Abhängigkeiten gegenüber dem häufig zitierten Pauschalgrenzwert von 20 M.-% Holzfeuchte und liegt trotzdem stets auf der sicheren Seite.

Analog zur Bewertung des Schimmelpilzwachstumsrisikos können damit Holzbauteile sehr viel konkreter bewertet und bemessen werden. Im Kontext der Innendämmung sind die Inhalte und Regelungen des WTA-Merkblatts 6-8 immer dann von Relevanz, wenn in der Konstruktion Holzbauteile vorhanden sind.

### **3.3.6 WTA-Merkblätter 8-1 und 8-5 sowie weitere**

Schließlich gibt es aus dem Bereich der Fachwerkinstandsetzung schon seit vielen Jahren eine ganze Reihe von WTA-Merkblättern zu verschiedenen Aspekten. Von besonderer Relevanz für das Thema der Innendämmung sind hier die WTA-Merkblätter 8-1 [15] und 8-5 [16]. Das WTA-Merkblatt 8-1 formuliert grundsätzliche bauphysikalische Anforderungen an die Instandsetzung von Fachwerkgebäuden. Merkblatt 8-5 widmet sich konkret dem Thema der Innendämmung bei Fachwerkgebäuden. Beide Merkblätter gehen dabei vor allem auf die spezifischen Besonderheiten und Anforderungen von Fachwerkgebäuden ein, die sich z.T. sehr von denen sonstiger Gebäude unterscheiden. Für jeden, der mit der Sanierung von Fachwerkgebäuden betraut oder konfrontiert ist, sind die WTA-Merkblätter des Referats 8 »Fachwerk« als wesentliche Planungs- und Entscheidungsgrundlage anzusehen.

Das WTA-Merkblatt 8-5 aus dem Jahr 2008 wurde überarbeitet und erscheint demnächst als Neuentwurf.

## **4. Zusammenfassung**

Innendämmungen werden immer dann geplant und eingesetzt, wenn die Gebäudehülle thermisch ertüchtigt werden soll, eine Außendämmung jedoch nicht möglich oder sinnvoll ist. Da Innendämmungen die bauphysikalischen Verhältnisse verändern, müssen bei ihrem Einsatz die Aspekte des Mindestwärmeschutzes und des Feuchteschutzes berücksichtigt werden.

Für die Planung bedeutet dies, dass die Innendämmung mindestens so dimensioniert werden sollte, dass die Mindestwärmeschutzanforderungen erfüllt werden. Im Bereich von Wärmebrücken, d.h. den Anschlussdetails der Außenwände an Fenster oder einbindende Wände und Decken, sollte eine genauere Prüfung erfolgen. In der Regel werden hier durch die Innendämmung zusätzliche flankierende Maßnahmen erforderlich, die entsprechend geplant und dimensioniert werden müssen (z.B. Flankendämmung oder Laibungsdämmung).

Bezüglich des Feuchteschutzes müssen zum anderen der Feuchteeintrag von innen (Dampfdiffusion) und der Feuchteeintrag von außen (Schlagregen) betrachtet werden. Auf Grundlage einer gründlichen Bestandsaufnahme wird die Innendämmung geplant und bemessen. Für den rechnerischen Dampfdiffusionsnachweis ist das Glaserverfahren gemäß DIN 4108-3 nur bedingt

geeignet und kann daher nicht empfohlen werden. Hier sollte entweder das vereinfachte Nachweisverfahrens gemäß WTA-Merkblatt 6-4 angewandt oder der vollständige Feuchtenachweis mittels hygrothermischer Simulation nach WTA-Merkblatt 6-5 in Verbindung mit DIN EN 15026 bzw. WTA-Merkblatt 6-2 geführt werden.

Der Analyse der fassadenbezogenen Schlagregenbelastung und des jeweiligen Schlagregenschutzes ist besondere Beachtung zu schenken. Bei hoher Schlagregenbelastung sowie bei unabhängig von der Schlagregenbelastung nur geringem Schlagregenschutz (Sichtmauerwerk, Fachwerk) ist ein vollständiger Feuchtetechnischer Nachweis dringend empfohlen. Auch bei Berücksichtigung veränderlicher Klimarandbedingungen, kapillaraktiver Dämmssysteme oder auch komplexerer Anschlusssituationen muss der Nachweis über die hygrothermische Simulation erfolgen. Dies ist zwar aufwändiger, erlaubt jedoch sowohl das Materialverhalten der Konstruktion, als auch die klimatischen Randbedingungen standortbezogen und realitätsnah zu berücksichtigen.

Das grundlegende Vorgehen für die Aufstellung eines detaillierten Feuchtenachweises mithilfe entsprechender Berechnungsprogramme ist in den genannten Regelwerken skizziert. Für eine darüber hinausgehende Darstellung der bauphysikalischen Zusammenhänge sowie mit Beispielen illustrierte Erläuterungen zur Nachweisführung sei auf [20] verwiesen.

Die Innendämmung ist ein wichtiges und sinnvolles Instrument der Sanierungspraxis geworden. Viele historische Gebäude verdanken auch der Innendämmung ihre Nutzung unter modernen Anforderungen. Die Besonderheiten der Innendämmung sind heute zumeist gut plan- und beherrschbar, nicht zuletzt auch dank ihres zunehmenden Niederschlags im bauphysikalischen Regelwerk. Der Schlüssel zu einer guten Lösung liegt deshalb in der sorgfältigen Planung, Dimensionierung und Realisierung der gesamten Innendämmmaßnahme in Zusammenarbeit von Architekt, Bauphysiker und Ausführendem.

## Regelwerk

- [1] DIN 4108-2: 2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [2] DIN 4108-3:2014-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [3] DIN EN 15026: 2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [4] DIN EN ISO 6946:2015-06 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO/DIS 6946:2015); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 6946:2015
- [5] DIN EN ISO 10211:2015-06 Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO/DIS 10211:2015); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 10211:2015

- [6] DIN EN ISO 13788:2013-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012
- [7] EnEV 2014: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013 (am 16.10.2013 von der Bundesregierung beschlossen, am 21.11.2013 im Bundesgesetzblatt verkündet, am 01.05.2014 in Kraft getreten)
- [8] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GEG). Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Stand 23.01.2017.
- [9] WTA Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2002.
- [10] WTA Merkblatt 6-2-14/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2014.
- [11] WTA Merkblatt 6-3-05/D: Rechnerische Prognose des Schimmelwachstumsrisikos. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., 2005.
- [12] WTA Merkblatt 6-4-16/D: Innendämmung nach WTA-I - Planungsleitfaden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2016.
- [13] WTA Merkblatt 6-5-14/D: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmssystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., 2014.
- [14] WTA Merkblatt 6-8-16/D: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., 2016.
- [15] WTA Merkblatt 8-1-14/D: Fachwerkinstandsetzung nach WTA I: Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkgebäude. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Entwurfsveröffentlichung Dezember 2012.
- [16] WTA Merkblatt 8-5-08/D: Fachwerkinstandsetzung nach WTA V: Innendämmungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., 2008.

## **Veröffentlichungen**

- [17] Kehl, Daniel; Plagge, Rudolf; Grunewald, John: Wann geht Holz kaputt? – Nachweistechnische Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen. In: Bundesverband Feuchte und Altbausanierung e.V. -BuFAS-, Berlin (Veranstalter): Feuchte – Wärme – Schimmelpilz. 23. Hanseatische Sanierungstage vom 1. bis 3. November 2012 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012

- [18] Kehl, Daniel: Feuchtetechnische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA – Hygrothermische Auswertung der anderen Art. Holzbau. Die Neue Quadriga (2013), Nr. 6, S. 24–28
- [19] Künzel, H.M.: Was bedeuten die Hinweise zur Innendämmung in der DIN 4108-3 für die Praxis? Beitrag zum 4. Innendämmkongress in Dresden am 19./20. Mai 2017
- [20] Scheffler, G. A.: Bauphysik der Innendämmung. Fraunhofer IRB-Verlag, 2016.
- [21] Viitanen, H.; Toratti, T.; Makkonen, L.; Peuhkuri, R.; Ojanen, T.; Ruokolainen, L.; Räisänen, J.: Towards modelling of decay risk of wooden materials. European Journal of Wood and Wood Products 68(2010), p. 303–313

# Was bedeuten die Hinweise zur Innendämmung in der DIN 4108-3 für die Praxis?

Hartwig M. Künzel, Fraunhofer IBP

---

## 1 Einleitung

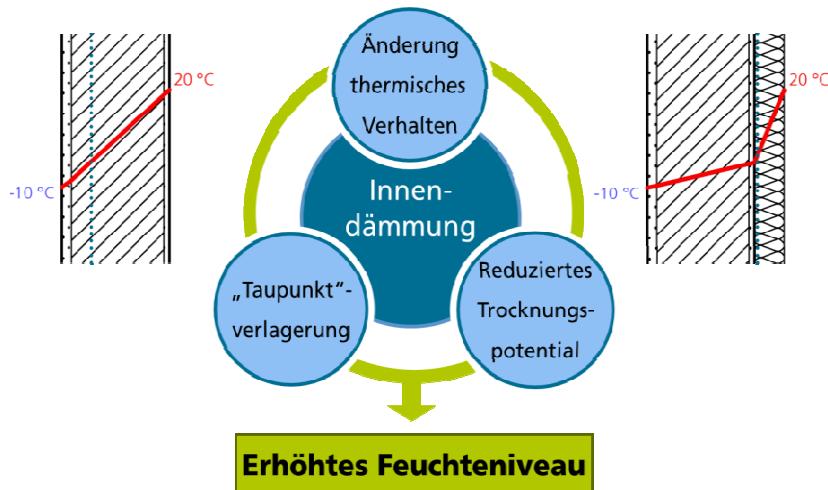
Wärmedämmung ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Dabei gewinnt die Innendämmung in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Dies liegt daran, dass bei einem nennenswerten Teil des Gebäudebestands, aus verschiedenen Gründen nur eine Innendämmung möglich ist. Dies sind z.B. Gebäude mit denkmalgeschützten oder erhaltenswerten Fassaden oder solche bei denen z.B. in Innenstadtlage kein Platz für eine Außendämmung vorhanden ist. Auch die sukzessive Sanierung einzelner Wohnungen erfolgt häufig mit Innendämmungen.

Da der Wohnflächenbedarf pro Person weiter steigt, wird im Zuge weiterer Energieeinsparbemühungen künftig auch der kurzfristigen Beheizung einzelner Räume nach Bedarf mehr Bedeutung zukommen. Hierbei bietet die Innendämmung den Vorteil, dass die massiven Wände nicht aufgeheizt werden müssen, was mit zusätzlichem Energiebedarf und längeren Vorheizzeiten verbunden ist. Bei Räumen, die nur temporär genutzt und deshalb kurzfristig beheizt werden – wie z.B. Kirchen oder Veranstaltungsräume – kann eine Innendämmung generell eine günstigere Lösung als eine Außendämmung darstellen.

### 1.1 Grundsätzliche Bauphysikalische Auswirkungen einer Innendämmung

Prinzipiell gilt, dass eine Dämmschicht auf der Außenseite der Konstruktion bauphysikalisch aber auch bezüglich der Vermeidung von Wärmebrücken unter mitteleuropäischen Klimabedingungen eine Reihe an Vorteilen mit sich bringt. Beispielsweise wirkt eine massive Wandkonstruktion wie eine Dampfbremse so, dass in der Regel keine Probleme mit Tauwasser in der Dämmung auftreten. Die Bestandswand innerhalb der Dämmschicht bleibt ganzjährig warm und zusammen mit dem meist guten Regenschutz des Außendämmssystems auch trocken.

Bei der Innendämmung ist dies umgekehrt: Die Wand wird kälter als zuvor und damit zwangsläufig auch feuchter. Bei dickeren Dämmschichten wird auf der Rückseite der Dämmung die Taupunkttemperatur der Raumluft meist unterschritten – der Feuchteintrag über Diffusion muss daher durch geeignete Maßnahmen begrenzt und eine Hinterströmung der Dämmung mit Raumluft auf jeden Fall vermieden werden. Diese Einflüsse sind vereinfacht in „Abbildung 1“ dargestellt. Alle Anforderungen sind allerdings ähnlich wie bei Leichtbauteilen (Dachkonstruktionen, Holzbau) durch eine sorgfältige Planung und Ausführung in der Regel gut beherrschbar.



**Abbildung 1:** Veränderung der hygrothermischen Verhältnisse in einem Bauteil nach Anbringen einer Innendämmung.

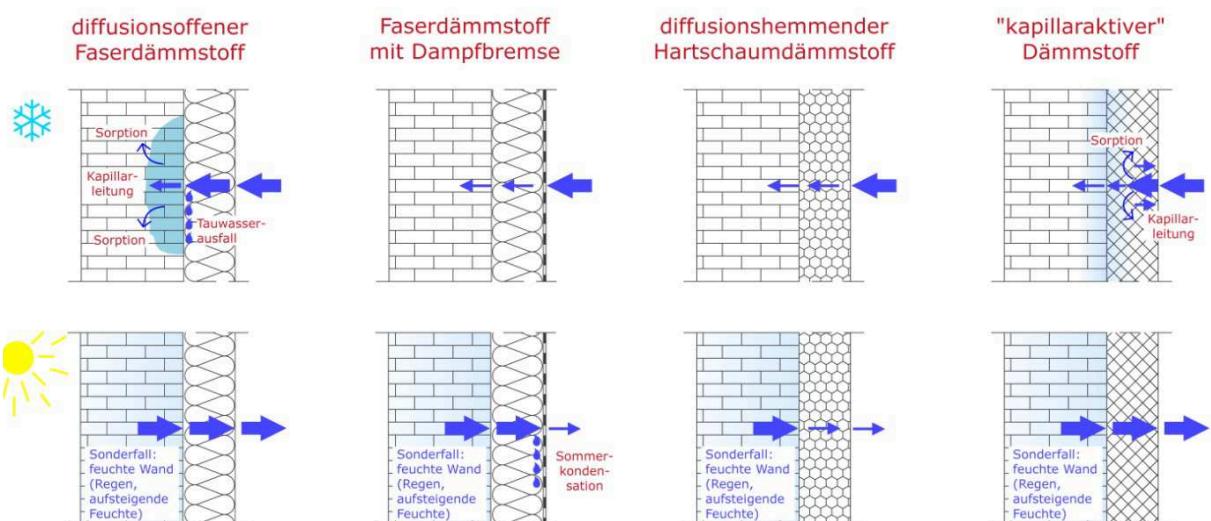
Kritisch bei der Innendämmung ist nach heutigem Stand der Technik nicht nur der Feuchteintrag von innen, sondern oft auch der von außen. Dabei ist vor allem die Belastung durch Schlagregen zu nennen. Ältere Bauteile haben oft einen unzureichenden Schlagregenschutz – wenn auf eine solche Wand ohne begleitende Maßnahmen eine Innendämmung aufgebracht wird, kann es infolge der nun viel langsameren Trocknung zu Durchfeuchtungen und anschließenden Frostschäden kommen. Geeignete Maßnahmen zur Verbesserung des Schlagregenschutzes sind z.B. ein neuer wasserabweisender Putz oder Anstrich bzw. auch eine Fassadenhydrophobierung – auf jeden Fall sollte eine möglichst regendichte aber gleichzeitig diffusionsoffene Außenoberfläche hergestellt werden, um eine geringe Befeuchtung und leichte Trocknung zu gewährleisten. Ist dies nicht möglich, dann bleibt – zumindest auf der Schlagregenseite – nur eine Begrenzung der Dicken der Innendämmung auf ein bezüglich der Trocknung unkritisches Maß von ggf. nur wenigen Zentimetern. In solchen Fällen sollte auf diese wenigen Zentimeter aber nicht verzichtet werden: die ersten Zentimeter einer Wärmedämmung haben für die Verringerung der Wärmeverluste den stärksten Effekt und speziell bei der Innendämmung kommt auch noch eine Verbesserung des Behaglichkeitsempfindens und eine Reduktion des Schimmel- pilzrisikos durch ein Anheben der Wandinnenoberflächentemperaturen dazu.

## 1.2 Überblick über verschiedene Innendämmssysteme

„Abbildung 2“ gibt einen Überblick über typische Innendämmssysteme und deren Feuchteverhalten im Sommer und im Winter. Ganz links ist eine diffusionsoffene Faserdämmung ohne Dampfbremse dargestellt. Auf der kalten Rückseite der Dämmung kann sich im Winter Tauwasser bilden – dies ist bei einem saugfähigen Untergrund bis zu einem gewissen Grad tolerabel, sorgt aber für eine zusätzliche Befeuchtung der Bestandswand. Niederschlagsfeuchte oder Tauwasser können im Sommer durch die offene Dämmung zwar gut nach innen austrocknen, trotzdem ist eine solche Lösung nur zur Verbesserung von Komfort und Hygiene im Innenraum bis zu wenigen Zentimetern Dicke akzeptabel.

Bei größeren Dicken ist eine zusätzliche Dampfbremse erforderlich. Diese reduziert den Feuchteintrag über Diffusion im Winter deutlich – beeinträchtigt im Sommer bei konstant dichter Dampfbremsbahn allerdings auch eine, in manchen Fällen erforderliche Trocknung nach innen bzw. kann bei feuchtem Mauerwerk durch Umkehrdiffusion sogar zu Tauwasserbildung in der Dämmung vor der Dampfbremse führen. Die beste Lösung ist hier meist die Verwendung einer sog. feuchteadaptiven oder feuchtevariablen Dampfbremse.

Im Prinzip ähnlich verhalten sich diffusionshemmende Hartschaumdämmungen ohne zusätzliche Dampfbremse. Auch sie schützen im Winter vor Feuchte aus dem Innenraum, behindern aber eine Trocknung im Sommer. Beide Dämmsysteme haben in der Regel sehr gute Dämmeigenschaften und sind immer dann vorteilhaft, wenn von außen keine Feuchte kommt – also bei gutem Schlagregenschutz und trockenen Bestandswänden.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Wirkweise verschiedener Innen-dämmungen im Sommer und im Winter

Kann der Schlagregenschutz nicht im gewünschten Maß verbessert werden, sollte die Trocknungsmöglichkeit im Sommer nach innen nicht zu stark beeinträchtigt werden. Dies ist insbesondere bei feuchtempfindlichen Bauteilen wie z.B. bei Fachwerkwänden von Bedeutung. In Leibungsbereichen und bei Anschlussdetails kommen auch immer häufiger Hochleistungsdämmstoffe wie Aerogele oder VIP zum Einsatz, die auch bei geringen Materialdicken noch eine gute Dämmleistung erreichen. Sie sind bei geringer Feuchtebelastung von außen auch für die flächige Anwendung interessant – allerdings derzeit noch deutlich teurer als konventionelle Dämmstoffe.

## 2 Feuchttechnische Beurteilung von Innendämmssystemen nach DIN 4108-3

Die Fassung der DIN 4108-3 vom November 2014 [1] wurde im Juni 2015 in die Musterliste der technischen Baubestimmungen des DIBT ohne den Anhang D aufgenommen. Die Norm ist damit bauaufsichtlich eingeführt. Der Anhang D eröffnet die Möglichkeit einen Feuchteschutznachweis durch hygrothermische

Simulation gemäß DIN EN 15026 [2] zu führen. Er ist in der Norm als nur informativ gekennzeichnet, weshalb er nicht bauaufsichtlich eingeführt worden ist. Der betreffende Normungsausschuss ist dennoch der Meinung, dass die Simulation für den feuchtetechnischen Nachweis genutzt werden kann. Andernfalls wäre die normgerechte Anwendung aller Bauteile, die weder zu den nachweisfreien Konstruktionen gehören noch mithilfe des Glaserverfahrens nachweisbar sind, ausgeschlossen.

## 2.1 Nachweisfreie Innendämmssysteme

Alle in der DIN 4108-3 [1] aufgeführten nachweisfreien Konstruktionen sind auf den Einsatz für Wohngebäude und wohnähnlich genutzte Gebäude beschränkt. Nachweisfrei sind Innendämmssysteme auf folgenden Außenwandkonstruktionen aus ein- oder zweischaligem Mauerwerk, Normalbeton, und gefügedichtetem oder haufwerksporigem Leichtbeton unter folgenden Bedingungen:

- Keine Schlagregenbeanspruchung
- Einströmen von Raumluft hinter die Dämmung ist durch geeignete Maßnahmen zu unterbinden
- R-Wert der Innendämmung  $\leq 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $s_d$ -Wert des Innendämmssystems inklusive raumseitiger Bekleidung  $\geq 0,5 \text{ m}$

Bei einer sehr geringfügigen Innendämmung ( $R\text{-Wert} \leq 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) entfällt die Anforderung an den Diffusionswiderstand. Bei einer Innendämmung auf Holzfachwerkwänden gilt bei einem R-Wert zwischen  $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$  wegen der Feuchteempfindlichkeit der Konstruktion ein verkleinerter Bereich für den Diffusionswiderstand der Dämmung einschließlich raumseitiger Bekleidung:  $1,0 \text{ m} \leq s_d \leq 2,0 \text{ m}$ .

## 2.2 Nachweis mithilfe des Periodenbilanzverfahrens

Das stationäre Verfahren zur Berechnung von Diffusionsvorgängen nach Glaser in der DIN 4108-3 [1] ist nur anwendbar bei **nicht** klimatisierten Wohn- oder wohnähnlich genutzten Räumen.

Es ist **nicht** anwendbar zur Berechnung

- Des natürlichen Austrocknungsverhaltens, wie z. B. im Fall der Abgabe von Rohbaufeuchte oder nach Aufnahme von Niederschlagswasser. D.h., die für innen gedämmte Wände häufig kritischen Auswirkungen einer Schlagregenbeanspruchung können nicht berücksichtigt werden, da die kapillare Wasseraufnahme einen Flüssigtransport darstellt, der mit einem reinen Dampfdiffusionsmodell nicht abbildbar ist.
- Von Konstruktionen, die an klimatisierte oder deutlich anders beaufschlagte Räume angrenzen (z. B. Schwimmbäder). Eine Anpassung der Randbedingungen zur Berücksichtigung abweichender Außen- oder Raumklimabedingung ist nicht vorgesehen.

- Von nachträglichen Innendämmungen mit  $R > 1,0 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  auf einschaligen Außenwänden mit ausgeprägten sorptiven und kapillaren Eigenschaften. D.h., die feuchtetechnische Beurteilung von kapillaraktiven Innendämmsystemen mit größeren R-Werten mithilfe des Periodenbilanzverfahrens ist grundsätzlich nicht möglich.

Für die oben genannten Fälle sowie für alle Anwendungsbereiche, die durch die DIN EN 15026 [2] abgedeckt sind, können zur Feuchteschutzbeurteilung hygro-thermische Simulationen nach Anhang D durchgeführt werden.

Die Randbedingungen für das allgemein bekannte Rechenverfahren nach Glaser der vorangegangenen Versionen der DIN 4108-3 setzten sich aus einer 60-tägigen Tau- und einer 90-tägigen Verdunstungsperiode zusammen. Für die Tauperiode wurden außen  $-10^\circ\text{C} / 80\% \text{ r. F.}$  und auf der Raumseite  $20^\circ\text{C} / 50\% \text{ r. F.}$  angenommen. Während der Verdunstungsperiode sollen auf beiden Seiten  $12^\circ\text{C} / 70\% \text{ r. F.}$  herrschen. Diese Randbedingungen entsprechen weder einem typischen deutschen Winter noch einem typischen Sommer. Sie basieren auch nicht auf Untersuchungen sondern wurden für die ausschließliche Verwendung im Zusammenhang mit der Glaserberechnung gegriffen allerdings recht gut, wie sich im Laufe des praktischen Einsatzes herausgestellt hat. Seit der Veröffentlichung der DIN EN ISO 13788 [3] im Jahr 2001 (die aktuelle Fassung vom Mai 2013 wurde in der DIN 4108-3 vom Nov. 2014 noch nicht berücksichtigt) ergab sich außerdem ein Handlungsbedarf durch die europäischen Harmonisierungsvorgaben. Diese internationale Norm beschreibt ein Glaserverfahren, dessen Randbedingungen auf Monatsmittelwerten beruhen, die national festzulegen sind. Diese Festlegung hat jedoch in Deutschland bislang nicht stattgefunden. Stattdessen wurden die Block-Randbedingungen des bisherigen Verfahrens, wie folgt angepasst.

Das neue Rechenverfahren nennt sich Perioden-Bilanzverfahren. Es geht davon aus, dass für die Tauwasserbildung und die anschließende Verdunstung in erster Linie die Winter- bzw. Sommermonate eine Rolle spielen, während die Übergangszeiten von untergeordneter Bedeutung sind. Deshalb werden die Diffusionsberechnungen nicht, wie in der DIN EN ISO 13788 [3] Vorlage auf der Basis von Monatsmittelwerten durchgeführt. Stattdessen werden die Wintermonate zu einer 90-tägigen Tauperiode und die Sommermonate zu einer 90-tägigen Verdunstungsperiode zusammengefasst. Dadurch gelingt es, das neue Verfahren sehr ähnlich aussehen zu lassen, wie das alte. Allerdings wurden jetzt die Randbedingungen an die tatsächlich auftretenden Klimabedingungen angepasst. Für die Tauperiode gelten fortan folgende Randbedingungen:

**Tabelle 1:** Randbedingungen für die Tauperiode des Periodenbilanzverfahrens

Tauperiode	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	Relative Feuchte [%]	Wasserdampf-partialdruck [Pa]	Dauer [h]
Raumklima	20	50	1168	2160
Außenklima	-5	80	321	

Der Vergleich mit den bisherigen Blockrandbedingungen zeigt nur bei der Außenlufttemperatur eine leichte Anhebung von -10 °C auf -5 °C. Allerdings ist die Tauperiode bei den neuen Randbedingungen um 50 % länger, so dass für viele Konstruktionen eine etwas höhere Tauwassermenge zu verzeichnen sein wird.

Bei der Verdunstungsperiode wird darauf verzichtet, die Temperaturen und relativen Luftfeuchten anzugeben. Hier werden nur noch die Wasserdampfpartialdrücke als Randbedingungen definiert. Das hat den Vorteil, dass es auf dem Papier nicht mehr zu einer Überschneidung von Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck kommen kann (ohne Kenntnis der Temperaturbedingungen kann kein Sättigungsdampfdruck errechnet werden). Die inneren und äußeren Wasserdampfpartialdrücke sind wie bisher gleich groß. Sie wurden jedoch von 982 Pa auf 1200 Pa angehoben, was beispielsweise bei einer Luftfeuchte von 70 % einer Temperatur von ca. 15 °C entspricht. Ebenfalls angehoben wurden die Partialdrücke in den Tauwasserebenen für Wände (Decken oder Dächer sind Gegenstand dieser Arbeit). Sie betragen jetzt 1700 Pa (Sättigungsdampfdruck bei 15 °C) statt vorher 1403 Pa.

**Tabelle 2:** Randbedingungen für die Verdunstungsperiode

Verdunstungsperiode	Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	Wasserdampfpartialdruck [Pa]	Dauer [h]
Raumklima	-	-	1200	2160 (90 d)
Außenklima	-	-	1200	
TW-Ebene Wand	-	-	1700	

Vergleichsuntersuchungen mit den alten und neuen Randbedingungen in [4] haben für verschiedene Wand- und Dachkonstruktionen im Großen und Ganzen ähnliche Beurteilungen ergeben. Allerdings gibt es auch Beispiele für unterschiedliche Ergebnisse. Wenn beispielsweise in einer Konstruktion erst bei Außentemperaturen unter -5 °C Tauwasser ausfällt, dann sind die alten Randbedingungen kritischer. Fällt Tauwasser über -5 °C aus, dann können die neuen Randbedingungen kritischer sein, weil die Tauperiode länger andauert. Hier wird erst die langjährige Praxis zeigen, ob diese Unterschiede im Einzelfall eine wesentliche Rolle spielen. Die neuen Randbedingungen für die Tauperiode sind für Wände mit Innendämmung ohne Dampfbremse etwas ungünstiger als die alten. Umgekehrt führen die neuen Randbedingungen für die Verdunstungsperiode bei denselben Konstruktionen zu einer etwas höheren Verdunstungsmenge. In der Summe sind die Ergebnisse aber ähnlich, wobei die neuen Randbedingungen tendenziell zu etwas ungünstigeren Ergebnissen bei innen gedämmten Wänden führen.

## 2.3 Anforderungen an den Schlagregenschutz

Während bei den nachweisfreien Konstruktionen eine Schlagregenbeanspruchung der innen gedämmten Außenwand explizit ausgeschlossen ist, gelten für Wände, die mithilfe des Periodenbilanzverfahrens nachgewiesen wurden, die in der Norm enthaltenen Hinweise zum Schlagregenschutz. Da das Glaser-Verfahren, wie bereits ausgeführt, ausschließlich die Wasserdampfdiffusion berücksichtigt, muss der Einfluss des Schlagregens separat beurteilt werden, um Schäden an Außenwandkonstruktionen vorzubeugen. Zum Schlagregenschutz von Wänden sagt die DIN 4108-3 [1] u. a. folgendes:

„Der Schlagregenschutz einer Wand zur Begrenzung der kapillaren Wasseraufnahme und zur Sicherstellung der Verdunstungsmöglichkeiten kann durch konstruktive Maßnahmen oder durch Putze bzw. Beschichtungen erzielt werden. Die zu treffenden Maßnahmen richten sich nach der Intensität der Schlagregenbeanspruchung, die durch Wind und Niederschlag sowie durch die örtliche Lage und die Gebäudeart bestimmt wird.“

Die Norm unterteilt das Bundesgebiet in drei Schlagregenbeanspruchungsgruppen:

- I geringe Beanspruchung mit Jahresniederschlagsmengen unter 600 mm
- II mittlere Beanspruchung mit Jahresniederschlagsmengen von 600 mm bis 800 mm
- III mittlere Beanspruchung mit Jahresniederschlagsmengen über 800 mm oder sehr windreiche Regionen auch bei geringeren Jahresniederschlagsmengen

Die Zuordnung der einzelnen Regionen Deutschlands zu den Schlagregenbeanspruchungsgruppen ist mithilfe einer Karte dargestellt, die immer wieder aktualisiert wurde. Mindestens genauso wichtig wie die regionale Zuordnung ist die Einstufung der Gebäudelage. Bei einer geschützten Lage kann die regionale Beanspruchungsgruppe um eins reduziert werden, bei einer exponierten Lage und bei Hochhäusern ist die nächst höhere Beanspruchungsgruppe zu wählen. Ob eine Lage als geschützt, normal oder exponiert anzusehen ist, liegt bis zu einem gewissen Grad im Ermessen des Planers. Auf der sicheren Seite liegt man mit Außenwandkonstruktionen, die die Anforderungen für alle drei Beanspruchungsgruppen erfüllen, wie z. B.:

- Gefügedichte Betonwände
- Außen mit WDVS oder Dämmputz gedämmte Wände
- Wände mit hinterlüfteter Bekleidung
- Wände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2
- Zweischaliges Mauerwerk mit dazwischen liegender Luftschicht oder Kerndämmung
- Wände aus Mauerwerk mit wasserabweisendem Außenputz

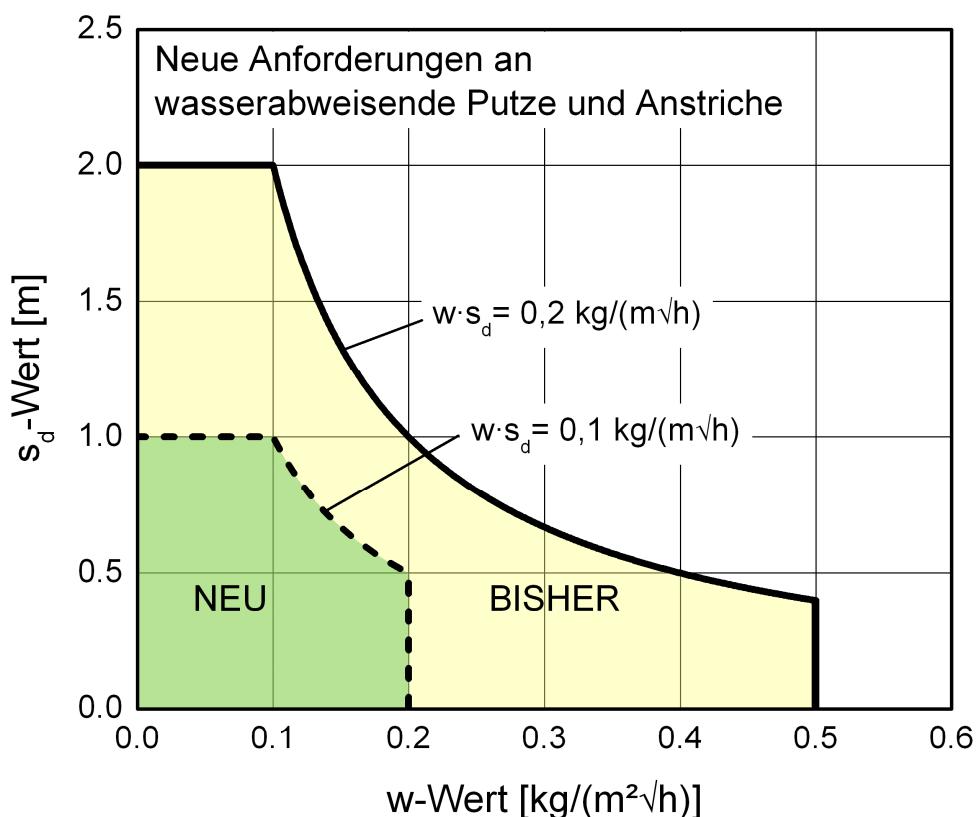
Da Außenwände aus verputztem Mauerwerk nicht nur im Bestand eine sehr weit verbreitete Konstruktion darstellen wurden die Anforderungen an wasserabweisende Außenputze bereits in den 80er-Jahren [5] genormt und 2001 in die DIN 4108-3 übernommen (Fehlerkorrektur erfolgte durch Berichtigung im April

2002). Als wasserabweisend geltende Putze müssen folgende Anforderungen erfüllen:

$$w \cdot s_d \leq 0,2 \text{ kg/(m}\sqrt{\text{h}}\text{)} \quad \text{mit} \quad w \leq 0,5 \text{ kg/(m}^2\sqrt{\text{h}}\text{)} \quad \text{und} \quad s_d \leq 2,0 \text{ m}$$

Dies bedeutet, dass die Außenoberflächenschicht generell Regen nur in geringem Maße aufnehmen darf und gleichzeitig diffusionsoffen sein muss. Durch die Kopp lung der beiden Größen wird berücksichtigt, dass eine größere Wasseraufnahme im Gegenzug auch ein größeres Trocknungspotential erfordert und umgekehrt.

In letzter Zeit haben rechnerische Untersuchungen zum Schlagregenschutz von innen gedämmten Wänden gezeigt, dass die oben genannten Anforderungen an wasserabweisende Putzsysteme nicht immer einen ausreichenden Schlagregenschutz gewährleisten [6, 7]; d.h. die Feuchte hinter der Innendämmung kann über 95 % r. F. ansteigen. Deshalb wurde in die Norm ein Hinweis auf die WTA-Merkblätter zur Innendämmung 6-4 [8] und 6-5 [9] aufgenommen. Dort sind die in „Abbildung 3“ dargestellten Anforderungskriterien zu finden, die deutlich schärfer sind als die derzeitigen Grenzwerte in der DIN 4108-3.



**Abbildung 3:** Darstellung der hygrothermischen Anforderungskriterien an wasserabweisende Putz- und Anstrichsysteme wie sie bisher in der DIN 4108-3 [8] verankert sind und die neu vorgeschlagene Verschärfung in WTA 6-5 [9].

## 2.4 Bemessung eines Bauteils mithilfe der hygrothermischen Simulation

Weltweit wird die vereinfachte Abschätzung der Feuchtebilanz mit Hilfe der sogenannten Glaserberechnungen immer mehr von hygrothermischen Simulationen abgelöst. In der DIN 4108-3 [1] wird dazu auf Anhang D verwiesen, der allerdings außer einem Hinweis auf die DIN EN 15026 [2] wenig Konkretes enthält. Etwas genauer beschäftigen sich das WTA-Merkblatt 6-5 [9] sowie die Technische Richtlinie zur Innendämmung von Außenwänden des Fachverbands WDVS [10] mit der rechnerischen Beurteilung von Innendämmssystemen. Dort sind Angaben zu den Randbedingungen bzw. zur Auswertung von hygrothermischen Simulationsrechnungen zu finden. Das erleichtert für den Praktiker die Anwendung der DIN EN 15026 [2]. Diese europäische Norm bildet die Grundlage für die Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen auf Basis der sich unter natürlichen Klimabedingungen innerhalb eines Bauteils einstellenden instationären Temperatur- und Feuchteverhältnisse. Dazu werden in den Simulationsmodellen u. a. die folgenden Wärme- und Feuchtetransport- bzw. Speichermechanismen berücksichtigt:

- Flüssigtransport (Saugen, Weiterverteilen)
- Wasserdampfdiffusion
- Feuchtespeicherung
- Regenwasserabsorption an der Außenoberfläche
- Wärmeleitung (feuchteabhängig)
- Wärmespeicherung
- Wärmetransport durch Feuchtetransport und Phasenwechsel
  - (Verdunstung, Kondensation)
- Schmelzwärme
- Strahlungsabsorption auf Außenoberflächen
- Usw.

Als Klimarandbedingungen sind stündliche meteorologische Daten mit Temperatur, Luftfeuchte, Solarstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie nach Möglichkeit atmosphärischer Gegenstrahlung zu verwenden. Die Materialdaten müssen neben den Standardkennwerten Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand zusätzlich Informationen zu Wärme- und Feuchtespeicherung, zum Flüssigtransport und ggf. zur Feuchteabhängigkeit der verschiedenen Kennwerte enthalten.

Hygrothermische Simulationen werden in der Regel eindimensional im Regelquerschnitt durchgeführt, im Falle von Wärmebrücken oder Anschlussdetails können aber auch mehrdimensionale Berechnungen erforderlich werden. Das WTA-Merkblatt 6-2 [11], das ursprünglich als Vorbild für die DIN EN 15026 diente und inzwischen überarbeitet wurde lässt mehrdimensionale Simulationen ausdrücklich zu.

Ähnlich wie bei der Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser wird für eine hygrothermische Simulation der Wandaufbau mit den verschiedenen Materialschichten und Dicken eingegeben. Dabei enthalten die Simulationsprogramme in der Regel eine Materialdatenbank, die sowohl neue und herstellerspezifische als auch generische oder historische Materialdaten enthält. Neben den Standardkenn-

werten zu Diffusionswiderstand und Wärmeleitfähigkeit sind zusätzlich in Laborversuchen ermittelte Daten für Feuchtespeicherung und Flüssigtransport sowie die Abhängigkeit der Kennwerte von Temperatur und Feuchte (z.B. die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt) hinterlegt. Der Nutzer hat aber auch die Möglichkeit, eigene Materialdaten z.B. auf Basis von Messwerten einzugeben oder die hinterlegten Daten ggf. objektspezifisch anzupassen. Dabei sind allerdings die große Bandbreite und die gegenseitige Abhängigkeit der unterschiedlichen Kennwerte zu berücksichtigen und unsichere Parameter ggf. mit Sensitivitätsanalysen zu überprüfen.

Dem eingegebenen Bauteil wird dann eine bestimmte Orientierung (Himmelsrichtung) zugewiesen, um die in den Klimadaten enthaltenen richtungsabhängigen Lasten wie Sonnenstrahlung und Schlagregen korrekt umrechnen zu können. Zu Beginn der Berechnung können sowohl typische Baufeuchten als auch rechnerisch ermittelte oder gemessene Feuchteprofile angenommen werden. Startpunkt und Dauer der Berechnung sind situationsspezifisch zu wählen – diffusionshemmende Konstruktionen benötigen dabei erfahrungsgemäß längere Zeiträume zum Erreichen des sogenannten eingeschwungenen Zustands, bei dem sich die Verhältnisse nur noch mit den Jahreszeiten aber nicht mehr von Jahr zu Jahr ändern, als diffusionsoffene Bauteile. Aber auch eine langfristige Feuchteanreicherung, die vielleicht erst nach vielen Jahren zu kritischen Verhältnissen führt, kann erfasst werden. In der Regel ist von Berechnungszeiträumen von etwa 5 bis 10 Jahren auszugehen – diese dauern in der Simulation allerdings nur wenige Minuten.

Als Ergebnis einer hygrothermischen Simulation erhält man zeitliche Verläufe der Temperatur- und Feuchteprofile bzw. Wassergehaltsverläufe in den verschiedenen Materialschichten. Das erste Beurteilungskriterium betrifft den Gesamtwassergehalt – dieser darf fallen oder auf dem Ausgangsniveau verbleiben, sollte aber nicht über den gesamten Berechnungszeitraum steigen. Anschließend werden die hygrothermischen Verhältnisse in den einzelnen Materialschichten sowie an den Oberflächen und Materialgrenzen bewertet. Die für die Beurteilung einer Innendämmmaßnahme relevante Zone befindet sich i.a. im Bereich hinter der Innendämmung, der entsprechend den Vorgaben des WTA-Merkblatts 6-5 [9] zu bewerten ist.

### 3 Schlussfolgerungen

Eine Innendämmung erfordert etwas mehr Planungs- und Ausführungsaufwand als andere Außenwandsysteme. Leider lässt die DIN 4108-3 [1] den Planer in Bezug auf die Feuchteschutzbeurteilung von Innendämmmaßnahmen sprichwörtlich etwas im Regen stehen. Die dort aufgeführten nachweisfreien Konstruktionen, für die sowieso nur eine sehr geringe Dämmstärke zulässig ist, gelten ausschließlich für Wände ohne Schlagregenbeanspruchung. Mit Hilfe des Periodenbilanzverfahren lässt sich auch für Dämmstärken  $R > 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$  ein Unbedenklichkeitsnachweis führen solange ein ausreichender Schlagregenschutz gewährleistet ist. Für den Nachweis von sorptiven und kapillaraktiven Innendämm-system ist das Periodenbilanzverfahren ausdrücklich nicht anwendbar. Das liegt vor allem daran, dass dieses Verfahren weder die sorptive Feuchtespeicherung

noch die kapillare Rückleitung berücksichtigen kann. Natürlich kann man für die Planung einer Innendämmmaßnahme immer die hygrothermische Simulation zur Hilfe nehmen, allerdings ist das auch mit einem etwas höheren Aufwand verbunden. Daher wäre es wünschenswert, die Palette der nachweisfreien Konstruktionen mit Innendämmung zu erweitern. Wichtig ist außerdem eine genaue Analyse der Schlagregenbeanspruchung am Objekt. Ist diese mittel bis stark wird man nur in Ausnahmefällen um einen effektiven Schlagregenschutz herumkommen.

**Nachsatz:** Die Interpretation der Inhalte der DIN 4108-3 im kürzlich veröffentlichten Kommentar zu dieser Norm [12] wurde nicht mit dem zuständigen Normungsausschuss abgestimmt. Sie entspricht in einigen Punkten, wie z.B. bei der Beurteilung der hygrothermischen Simulation, nicht der Auffassung der Ausschussmehrheit. Das Beispiel zur Beurteilung einer Innendämmung mithilfe des eingangs beschriebenen Periodenbilanzverfahrens war zwar im Entwurf von 2012 enthalten, wurde aber, wegen größerer Bedenken im Ausschuss, nicht in die aktuelle Fassung von 2014 übernommen. Es ist daher unverständlich warum es im Kommentar zur Norm von 2016 wieder auftaucht.

## Literatur

- [1] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, November 2014.
- [2] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Juli 2007.
- [3] DIN EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, November 2001.
- [4] Ackermann, TH., Kießl, K. und Gafe, M.: Systematische rechnerische Untersuchungen zur ergänzenden Absicherung vereinfachter nationaler Klima-Randbedingungen bei der Übernahme des Diffusionsnachweisverfahrens gemäß EN ISO 13788 in die nationale Feuchteschutznorm DIN 4108-3. Bauforschung Band T3288, IRB Verlag, Stuttgart 2013.
- [5] DIN 18550-1:1985: Putz; Begriffe und Anforderungen
- [6] Borsch-Laaks, R.: Keine Angst vor Innendämmung! Bauphysikalische Nachweise für Lösungen vom Holzbauer. Holzbau/dnq 2014, H. 2, S. 23-30.
- [7] Zirkelbach, D. & Künzel, H.M.: Innendämmung von Außenwänden: Planungshinweise und Systemauswahl. Detail Green 2/2013, S. 65-69.
- [8] WTA-Merkblatt 6-4: Innendämmung nach WTA I – Planungsleitfaden. Mai 2009, Neufassung Oktober 2016.
- [9] WTA-Merkblatt 6-5: Innendämmung nach WTA II - Nachweis von Innendämmssystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren, April 2014.
- [10] Technische Richtlinie des Fachverband WDVS zur Dämmung von Außenwänden. mit Innendämmssystemen. Planung - Ausführung –

- Nutzungshinweise. Januar 2012, Neufassung September 2016 ([www.innendaemmsysteme.de](http://www.innendaemmsysteme.de)).
- [11] WTA-Merkblatt 6-2: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Mai 2002, Neufassung Dezember 2014.
- [12] Ackermann, Th. & Kießl, K.: Klimabedingter Feuchteschutz von Außenbauteilen – Kommentar zur DIN 4108-3:2014-11. Beuth Verlag, Berlin 2016.

# Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 1) Folgen für die Vertragspraxis

Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz

---

**Vor allem bei Projekten mit längerer Laufzeit können sich zwischen Vertragsabschluss und Abnahme allgemein anerkannte Regeln der Technik ändern oder neue öffentlich-rechtliche Vorgaben in Kraft treten. Lesen sie, welche Konsequenzen sich daraus für Planer und Ausführende ergeben.**

Durch die ständige Fortentwicklung baupraktischer Verfahrensweisen und komplexer Normungsarbeiten haben Planer und Ausführende mit einer unüberschaubaren Vielfalt technischer Regelwerke zu tun. Die Beachtung dieser Regelwerke ist bauordnungsrechtlich zwingend, soweit sie beispielsweise als technische Baubestimmungen zum Bestandteil öffentlich-rechtlicher Regelungen werden oder in öffentlich-rechtlichen Regelwerken auf sie verwiesen wird.

In zivilrechtlicher Hinsicht sind technische Regeln vor allem dann von Bedeutung für das vertraglich geschuldete Bausoll, wenn sie rechtlich als allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT) einzuordnen sind. Denn soweit sich aus Verträgen keine konkreten Beschaffenheitsvereinbarungen ergeben, sind aaRdT heranzuziehen, um den einzuhaltenden Mindeststandard zu bestimmen. Die allgemein anerkannten Regeln der Technik gelten stets als stillschweigend vereinbart, wenn keine abweichenden Vereinbarungen getroffen werden.

Gerade bei Projekten mit längerer Laufzeit kann es zwischen Vertragsabschluss und Abnahme zum Wandel gesetzlicher Rahmenbedingungen oder der als allgemein anerkannt geltenden technischen Regeln kommen. Hierdurch können sich die bei Vertragsschluss definierten Annahmen für Leistungsumfang und Vergütung ändern.

Aus Sicht von Planern und Bauausführenden stellt sich dann zunächst die Frage, ob und unter welchen Voraussetzungen überhaupt eine Änderung bzw. Anpassung an die „neuen“ Standards erforderlich ist. Müssen Auftraggeber dies ausdrücklich verlangen oder gehört die Einhaltung der geänderten Regeln ohnehin zum vertraglich geschuldeten Soll? Greift im Hinblick auf potenzielle Vergütungsfolgen das Argument, allein die Einhaltung aaRdT zum Zeitpunkt der Abnahme sei maßgeblich, sodass der Auftragnehmer das Kostenrisiko zu tragen habe? Diese Fragen beantworten Teil 1 und Teil 2 der dreiteiligen Reihe.

Im dritten Teil geht es darum, welche haftungsrechtlichen Konsequenzen sich für Planer und Ausführende infolge Nichtbeachtung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT ergeben. Haften Auftragnehmer auch dann, wenn sich die zum Abnahmezeitpunkt maßgeblichen aaRdT aufgrund neuerer Erkenntnisse als nicht zutreffend erweisen? Und – sollten sich die aaRdT erst nach Abnahme geändert haben – ist dann nach alten oder neuen Regeln nachzubessern?

In der Reihe werden wesentliche rechtliche Aspekte gebündelt und Konsequenzen für die Vertragspraxis aufgezeigt. Ausgehend von den skizzierten Fragestellungen gibt der vorliegende Beitrag einen Überblick, welche Rechte und Pflichten die Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT nach Vertragsschluss bei den Vertragspartnern auslöst.

### Wandel öffentlich-rechtlicher Anforderungen

Öffentlich-rechtliche Anforderungen unterliegen nicht der Dispositionsfreiheit der Parteien – sie können nicht vertraglich ausgeschlossen werden. Auftraggeber haben demzufolge auch nicht die Möglichkeit, ein Abweichen von öffentlich-rechtlichen Vorgaben „anzuordnen“. Das OLG Brandenburg [1] lehnte die Werklohnforderung für den Einbau einer Fußbodenheizung ohne thermostatische Raumtemperaturregelung mit der Begründung ab, dass allein der Verstoß gegen die Vorgaben der EnEV die Mangelhaftigkeit der Werkleistung begründe. Der Einwand, diese Ausführungsart sei in Abweichung vom Angebot (System mit Raumthermostaten) vertraglich vereinbart worden, beeindruckte das Gericht nicht.

In öffentlich-rechtlicher Hinsicht (bauordnungsrechtlich) ist grundsätzlich das Einhalten der zum Zeitpunkt der Bauantragstellung geltenden Anforderungen maßgeblich für die Erteilung der Genehmigung. Sollten sich aber die gesetzlichen Anforderungen nach diesem Zeitpunkt ändern, ist dies zwar öffentlich-rechtlich ohne Bedeutung, jedoch zivilrechtlich relevant.

Bei einer Auseinandersetzung über die bauvertraglichen Auswirkungen der WSchVO 1995, die nach Bauantrag und noch vor Ausführung in Kraft getreten war, hat das OLG Düsseldorf [2] dies bereits unmissverständlich klargestellt. Der Bauträger hatte es versäumt, die Wohnungseigentümergemeinschaft von den neuen Bestimmungen in Kenntnis zu setzen und musste Schadensersatz für zusätzliche Wärmeschutzmaßnahmen leisten. Die Auftraggeber hatten nicht ausdrücklich von der Anwendung der neuen Regelungen in Abweichung von der Baugenehmigung abgesehen, sodass die Voraussetzungen für eine Ausnahme von der Einhaltung der WSchVO 1995 für das Gericht nicht gegeben waren.

Diese Entscheidung zeigt – auch mit Blick auf die kommende EnEV – dass Auftragnehmer neue Anforderungen im Auge behalten müssen. Bei deren Inkrafttreten sind frühzeitig rechtssichere Vertragsgrundlagen für die weitere Ausführung bereits laufender Projekte herbeizuführen. In jedem Fall ist auf die Änderung öffentlich-rechtlicher Anforderungen schriftlich hinzuweisen und eine ausdrückliche Vereinbarung über die anzuwendenden Rechtsnormen zu treffen.

### Wandel aaRdT nach Vertragsabschluss

Rechtlich ist eine technische Regel nur dann als aaRdT zu qualifizieren, wenn sie – neben ihrer wissenschaftlichen Unanfechtbarkeit – „insbesondere in dem Kreise der für die Anwendung der betreffenden Regeln maßgeblichen, nach dem neuesten Erkenntnisstand vorgebildeten Techniker durchweg bekannt und aufgrund fortdauernder praktischer Erfahrung als technisch geeignet, angemessen und notwendig anerkannt sind.“ [3]

Technische Regeln, die in DIN-Normen und anderen überbetrieblichen Regelwerken niedergelegt sind, können die aaRdT wiedergeben, hinter diesen zurückbleiben [4] oder aber dem „Stand der Technik“ entsprechen. Im letzten Fall steht – bei juristischem Begriffsverständnis – ihre praktische Bewährung noch aus. Da es sich durchweg um private technische Regelungen mit Empfehlungscharakter handelt, ist deren Einhaltung nicht von Bedeutung für den Begriff der aaRdT.

Nach ständiger Rechtsprechung ist die Werkleistung im Allgemeinen mangelhaft, wenn sie nicht den zur Zeit der Abnahme anerkannten Regeln der Technik als vertraglichem Mindeststandard entspricht [5]. Doch welche Konsequenzen ergeben sich daraus bei der Änderung aaRdT zwischen Vertragsschluss und Abnahme? Übernehmen Planer und Ausführende mit Vertragsschluss per se die Haftung für das Einhalten neuer Normstandards einschließlich damit verbundener Kostenrisiken? Oder sind Auftragnehmer weder verpflichtet noch berechtigt, eigenmächtig Änderungsleistungen vorzunehmen? Unter welchen Voraussetzungen bestehen Ansprüche auf zusätzliche Vergütung? Diese Fragen sind – soweit ersichtlich – von der Rechtsprechung nicht abschließend geklärt.

In der Rechtslehre besteht im Ergebnis Einigkeit darin, dass der Auftragnehmer bei Vertragsabschluss nur die Risiken kalkulieren kann, die er kennt [6]. Der Auftraggeber könnte daher seinerseits nicht davon ausgehen, dass der Auftragnehmer eine Leistung verspreche, deren Aufwand er überhaupt nicht abschätzen kann [7]. Zum Zeitpunkt des Vertragsschlusses nicht erkennbare Änderungen von aaRdT könnten daher nicht einkalkuliert werden [8].

Strittig ist allerdings die Begründung dieses Ergebnisses. Teilweise wird angenommen, dass nicht die zum Zeitpunkt der Abnahme, sondern die zum Zeitpunkt des Vertragsschlusses geltenden Regeln für die Beurteilung der Mangelfreiheit maßgeblich seien [9]. Nach weiteren Auffassungen ist – vor allem mit Blick auf die Zuweisung des Kostenrisikos – danach zu unterscheiden, ob die Änderung vor oder während der Bauausführung [10] oder ob sie – bei Planerverträgen – vor oder nach dem Erteilen der Genehmigung [11] erkennbar war. Damit wird infrage gestellt, ob bei der Änderung aaRdT nach Vertragsschluss hinsichtlich Mängelhaftung und etwaiger Vergütungsansprüche ausschließlich der Abnahmezeitpunkt von Bedeutung ist.

#### Hinweise als Bestandteil der Leistungspflicht

Schlüssig ist jedoch die Auffassung, wonach allein das vertraglich vereinbarte Bausoll zu betrachten ist. Da nur die im Angebotsstadium erkennbaren Risiken Eingang in die Kalkulation finden, können nicht erkennbare Risiken nicht zum geschuldeten Bausoll gehören. Treten sie während der Ausführung auf und hält sich der Auftragnehmer an das vereinbarte Bausoll, kann er keine mangelfreie Leistung zum Zeitpunkt der Abnahme erbringen. [12]. Da der Auftragnehmer jedoch Mangelfreiheit schuldet, ist er verpflichtet, mögliche und gebotene Hinweise, z. B. auf ergänzende oder korrigierende Leistungen, zu erteilen. Diese Hinweise zur „leistungsbezogenen mangelfreien Herstellung“ des Werkes sind im Bauvertragsrecht Hauptpflichten des Auftragnehmers [13]. Sie sind somit wesentlicher Bestandteil seiner Leistungspflicht.

Diese Grundsätze gelten auch für Architekten- und Ingenieurverträge. Für den Fall, dass sich öffentlich-rechtliche Vorgaben oder aaRdT nach Vertragsabschluss ändern, entstehen umfassende Aufklärungs- und Beratungspflichten. Insbesondere bei langen Projektlaufzeiten besteht die Verpflichtung, technische Entwicklungen im Hinblick auf die auszuführenden Leistungen fortlaufend im Blick zu haben. Dementsprechend führte beispielsweise zuletzt das OLG Dresden [14] aus: „[...] Der Ingenieur darf nicht auf dem Stand der ursprünglichen Planung stehen bleiben, sondern hat sich auf dem Laufenden zu halten und sein Werk auf Übereinstimmung mit den neuesten Regeln der Technik zu überprüfen. [...] Macht der Auftraggeber eine verbindliche Planungsvorgabe, muss der Ingenieur unmissverständlich und deutlich aufzeigen, dass das geplante Bauwerk schon im Moment seiner Errichtung nicht mehr den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen wird.“

Und das OLG München [15] konkretisiert in einer jüngst rechtskräftig gewordenen Entscheidung: „Ein Planer, der ein von den anerkannten Regeln der Technik abweichendes System zur Ausführung vorschlägt, darf sich nicht darauf beschränken, dem Auftraggeber die Unterschiede zwischen der herkömmlichen Herstellung und der davon abweichenden Ausführungsart zu erläutern. Er muss den Auftraggeber vielmehr umfassend darüber aufklären, welche Risiken und Folgen eine nicht den anerkannten Regeln der Technik entsprechende Planung mit sich bringen kann.“ Diese Grundsätze gelten auch dann, wenn der Auftraggeber selbst fachkundig ist.

Auf dieser Grundlage müssen die an Planung und Ausführung Beteiligten im nächsten Schritt eine eindeutige Entscheidung des Auftraggebers herbeiführen.

Der zweite Teil der Reihe zeigt auf, was hierbei zu beachten ist, insbesondere welche Aspekte bei der Vereinbarung von Abweichungen von aaRdT von Bedeutung sind und gibt einen Überblick, ob und in welchen Fällen Ansprüche auf zusätzliche Vergütung entstehen. Der dritte Teil widmet sich den Fragen, wie Planer und Ausführende haften, wenn öffentlich-rechtliche Vorgaben oder aaRdT nicht eingehalten werden, nach welchen Regeln bei Änderungen nach der Abnahme nachzubessern ist und in welcher Höhe Schadensersatzansprüche bestehen, wenn Auftragnehmer zu Recht eine Nachbesserung als unverhältnismäßig ablehnen.

## Quellen

- [1] OLG Brandenburg, Urteil vom 02.10.2008 – 12 U 92/08
- [2] OLG Düsseldorf, Urteil vom 23.12.2005 – 22 U 32/04, IBr 2006, 549
- [3] Reichsgericht, Urteil vom 11.10.1910, RGSt 44,75
- [4] BGH, Urteil vom 14.05.1998 – VII ZR 184/97
- [5] BGH, Urteil vom 14.05.1998 – VII ZR 184/97
- [6] Kappellmann/Schiffers, Vergütung Nachträge Behinderungsfolgen beim Bauvertrag, 6. Auflage, Band 2, Rn 570 – im Folgenden Kappellmann Bd. 2
- [7] Kniffka, Rolf – ibr-online-Kommentar Bauvertragsrecht, Stand: 20.08.2012, Rn 31 – im Folgenden Kniffka ibr-online
- [8] Kappellmann Bd. 2 Rn 570

- [9] Kniffka – ibr-online Rn 31
- [10] Herchen, André, Die Änderung der anerkannten Regeln der Technik nach Vertragsschluss und ihre Folgen, NZBau 2007, 139, 143
- [11] Kalte, Peter, Normänderung während der Planungsleistung, IBR 2012, 1068 (nur online)
- [12] Kappellmann Bd. 2 Rn 570
- [13] Kappellmann/Schiffers, Vergütung Nachträge Behinderungsfolgen beim Bauvertrag, 6. Auflage, Band 1, Rn 100 – im Folgenden Kappellmann Bd. 1
- [14] OLG Dresden, Urteil vom 09.06.2010 – 1 U 745/09; BGH, Beschluss vom 28.07.2011 – VII ZR 106/10
- [15] OLG München, Urteil vom 14.04.2010 – 27 U 31/09 vorhergehend: LG Augsburg, 08.12.2008 – 6 O 1963/06 nachfolgend: BGH, 14.06.2012 – VII ZR 75/10

# Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 2) Folgen für die Vertragspraxis

Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz

---

**Ändern sich während der Projektlaufzeit allgemein anerkannte technische Regeln, muss der Auftragnehmer den Auftraggeber umfassend beraten, damit dieser über das weitere Vorgehen entscheiden kann. Der zweite Teil der Reihe zeigt auf, welche Aspekte von Bedeutung sind, wenn Abweichungen von aaRdT vereinbart werden und gibt einen Überblick, in welchen Fällen Ansprüche auf zusätzliche Vergütung entstehen.**

Über Ergänzungsleistungen gegenüber dem ursprünglich vereinbarten Bausoll entscheidet allein der Auftraggeber.

Kommt es zum Wandel gesetzlicher Rahmenbedingungen oder der als allgemein anerkannt geltenden technischen Regeln (aaRdT), nachdem der Vertrag geschlossen wurde, können sich die Annahmen für Leistungsumfang und Vergütung ändern. In Teil 1 der Reihe (GEB 02/2013) wurde dargestellt, dass Auftragnehmer verpflichtet sind, technische Entwicklungen im Hinblick auf laufende Projekte zu beobachten. Wenn neue Anforderungen in Kraft treten, sind frühzeitig rechtssichere Vertragsgrundlagen für die weitere Ausführung herbeizuführen. Soll eine Vorgehensweise vereinbart werden, die nicht den aaRdT entspricht, muss der Auftraggeber über mögliche Folgen informiert werden.

Beweiskräftig kommunizieren und dokumentieren

Auftraggebern muss demnach klar vor Augen geführt werden, für welches Risiko sie sich entscheiden. Auftragnehmer stehen mithin in der Verantwortung, ihre Auftraggeber so umfassend zu beraten, dass diese unter Abwägung sämtlicher technischer und wirtschaftlicher Vor- und Nachteile eine sachgerechte Entscheidung treffen können.

Die von beiden Parteien zu unterzeichnende Vereinbarung sollte folgende Aspekte im Blick haben:

- Wird der Sachverhalt, um den es beim Anwenden der technischen Regel geht, abschließend von der anzuwendenden Norm erfasst?
- Welche Unterschiede und vor allem Risiken ergeben sich hinsichtlich der konkreten Leistung (Vergleich zwischen altem und neuem Standard sowie zwischen aaRdT und höherem technischem Standard)?
- Beschreibung der vom Auftraggeber gewählten Ausführung und Darstellung der Punkte, in denen die technische Vorgehensweise nicht den aaRdT entspricht
- Welche Nachteile, Schäden, Kosten sind bei Abweichung von aaRdT zu erwarten?

- Haftungsausschluss für Gewährleistungs-, und Schadensersatzansprüche
- Haftungsfreistellung bezüglich potenzieller Ansprüche Dritter

### Entscheidung des Auftraggebers herbeiführen

Hat der Auftragnehmer ausdrücklich in der skizzierten Form darauf hingewiesen, dass sich die öffentlich-rechtlichen Anforderungen oder die aaRdT ändern und zusätzliche Leistungen zur Folge haben, ist eine schriftliche Vereinbarung und damit eindeutige Entscheidung des Auftraggebers herbeizuführen. Dies gilt für folgende Fälle:

- Änderung öffentlich-rechtlicher Anforderungen nach Bauantragstellung
- Änderung aaRdT nach Vertragsabschluss sowie
- jegliche Abweichung von den aaRdT

Bei den Leistungen, die infolge der Änderungen im Raum stehen, handelt es sich in der Regel um Ergänzungsleistungen gegenüber dem ursprünglich vereinbarten Bausoll. Deshalb kann und muss allein der Auftraggeber entscheiden, ob und in welchem Umfang solche Leistungen zu erbringen sind. Möglicherweise verzichtet er auf kostspielige Verbesserungen, was häufig der Fall sein wird, wenn sich bei weitestgehend oder gänzlich ausgeführten Leistungen Änderungen ergeben. Seine Entscheidung wird maßgeblich vom Planungs- oder Ausführungsstand und möglichen Kostensteigerungen abhängen.

Im Ergebnis bedeutet dies, dass potenzielle Ergänzungsleistungen ohne Entscheidung des Auftraggebers unbekannt bleiben und ohne dessen Anordnungen nicht definiert werden können, sodass sie nicht Teil der vertraglichen Vereinbarungen werden. Dies bedeutet jedoch auch, dass Auftragnehmer etwaige zusätzliche Leistungen weder eigenmächtig ausführen können noch dürfen.

### Anordnung des Auftraggebers verpflichtet zur Leistung

Folglich werden Auftragnehmer erst durch ausdrückliche Anordnungen des Auftraggebers zur Ausführung von Ergänzungsleistungen verpflichtet. Für den Bauvertrag greift hier § 1 Abs. 4 VOB/B, wonach nicht vereinbarte Leistungen, die zur Ausführung der vertraglichen Leistungen erforderlich werden, auf Verlangen des Auftraggebers mit auszuführen sind, es sei denn, der Betrieb des Auftragnehmers ist auf derartige Leistungen nicht eingerichtet.

Nichts anderes gilt für den Planervertrag: Auf Grundlage einer Beratung, die sämtliche entscheidungserheblichen Aspekte umfasst, hat auch hier der Auftraggeber die Entscheidung zu treffen, ob überhaupt und in welchem Umfang geänderte öffentlich-rechtliche Vorgaben und aaRdT in die Planung einzuarbeiten sind. Auch im Verhältnis zum Planer kann und muss allein der Bauherr die Verantwortung für etwaige zusätzliche Herstellungskosten,

Ausführungsverzögerungen sowie sonstige Abwägungen im Hinblick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis übernehmen.

Wenn Auftraggeber sich gegen eine Anpassung zu erbringender bzw. bereits erbrachter Leistungen entscheiden, stehen weder zusätzliche Honoraransprüche noch Haftungsfragen infolge der Änderungen zur Debatte.

### Vergütungsansprüche für zusätzliche Leistungen

Entscheiden sie sich hingegen infolge der Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT für Ergänzungsleistungen, sind zusätzliche Leistungen gesondert zu vergüten [1]. So führt der BGH aus: „Der für eine bestimmte Ausführungsart vereinbarte Werklohn umfasst, sofern die Kalkulation nicht allein auf den Vorstellungen des Auftragnehmers beruht, nur diese Ausführungsart, sodass der Auftraggeber Zusatzarbeiten, die für den geschuldeten Erfolg erforderlich sind, gesondert vergüten muss.“ [2]

Für den VOB/B-Vertrag folgt die Vergütungspflicht aus § 2 Abs. 6 oder § 2 Abs. 5 VOB/B. Für BGB-Verträge ergäbe sich diese formal aus ergänzender Vertragsauslegung, praktisch aus einer Übernahme der VOB/B-Regelung nach Treu und Glauben [3]. Soweit das Vergütungssoll nicht auf Grundlage des Vertrags bestimmt werden kann, muss die Anspruchshöhe im Zweifel unter Rückgriff auf § 632 Abs. 2 BGB erfolgen. Die Höhe der Vergütung richtet sich dann nach dem Marktpreis der Leistung („übliche Vergütung“).

Auch für Planerverträge gelten diese Grundsätze. Entscheiden sich Auftraggeber dafür, die Planung an die geänderten Vorgaben anzupassen, folge auch hier aus der „Anordnung“ durch den Auftraggeber ein Anspruch auf zusätzliche Vergütung.

Da die HOAI nur die Höhe des Honorars regelt, bieten ihre Regelungen grundsätzlich nicht den Anspruchsgrund, sie sagen also nichts über die rechtlichen Voraussetzungen für das Entstehen des Anspruchs aus. Allein daraus, dass sich der Auftraggeber entscheidet, Leistungen im Sinne des § 3 Abs. 2 HOAI anzuordnen, kann daher noch nicht folgen, dass zusätzlich erbrachte Planungsleistungen zu vergüten sind [4]. Denn § 3 Abs. 2 HOAI besagt nichts anderes, als dass die infolge von Anordnungen des Auftraggebers erforderlich werdenden „anderen“ Leistungen gesondert frei zu vereinbaren und zu vergüten sind, ohne dabei den preisrechtlichen Bestimmungen der HOAI zu unterliegen.

Der Anspruchsgrund ergibt sich vielmehr allein aus dem geschlossenen Werkvertrag. Analog den bereits erfolgten Ausführungen zum Bauvertrag ist naheliegend, die Vergütungspflicht im Wege ergänzender Vertragsauslegung in Anlehnung an die VOB/B-Regelung nach Treu und Glauben herzuleiten. Alleiniger Anknüpfungspunkt ist auch hier das ursprünglich vereinbarte Planungssoll. Leistungen, die bereits dessen Gegenstand sind, können keine zusätzlichen Leistungen sein.

Handelt es sich bei Leistungen, die infolge Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT angeordnet werden, um Wiederholungsleistungen, sind

auch diese (als Unterfall der Änderung des Leistungsumfangs) deswegen zusätzlich zu vergüten, weil sie eben nicht bei Vertragsschluss vorhersehbar und damit überhaupt einer Vereinbarung zugänglich waren.

## Ausblick

Teil 3 der Reihe befasst sich mit der Frage, wie Planer und Ausführende bei Nichteinhaltung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT haften, nach welchen Regeln bei Änderungen nach der Abnahme nachzubessern ist und in welcher Höhe Schadensersatzansprüche bestehen, wenn Auftragnehmer zu Recht eine Nachbesserung als unverhältnismäßig ablehnen.

## Quellen

- [1] Für Bauverträge im Allgemeinen siehe z. B. Übersicht bei Herchen, André, Die Änderung der anerkannten Regeln der Technik nach Vertragsschluss und ihre Folgen, NZBau 2007, 139. Für Planerverträge: Mischok, Christoph/ Hirsch, Mirco Peter, Änderung der anerkannten Regeln der Technik im Planungsprozess – Zusatzhonorar für den Planer? NZBau 2012, 480
- [2] BGH BauR 1990, 37 sowie Kappellmann Bd. 1 Rn 100 mit weiteren Nachweisen
- [3] Kappellmann Bd. 1, Rn 100, S. 44
- [4] So jedoch Mischok, Christoph/ Hirsch, Mirco Peter, NZBau 2012, 480, s.o.

# Allgemein anerkannt? Technische Regeln im Wandel (Teil 3) Folgen für die Vertragspraxis

Elke Schmitz, Kanzlei Schmitz

---

**Entspricht eine Leistung nicht den zum Abnahmezeitpunkt geltenden allgemein anerkannten technischen Regeln, kann dies das Vorliegen eines Baumangels begründen. Doch wie werden Erkenntnisse beurteilt, die erst nach der Abnahme zur Änderung von aaRdT führen? Teil 3 der Reihe befasst sich mit der Haftung, wenn geltende Standards nicht eingehalten werden.**

Sobald Änderungen für Planer und Ausführende erkennbar sind, muss der Auftraggeber schriftlich darauf hingewiesen werden.

Die bei Vertragsschluss definierten Annahmen für Leistungsumfang und Vergütung können sich deutlich ändern, wenn es während der Projektlaufzeit zum Wandel gesetzlicher Rahmenbedingungen oder der als allgemein anerkannt geltenden technischen Regeln (aaRdT) kommt. In den Teilen 1 und 2 (GEB 02/2013 und GEB 03/2013) wurde dargestellt, unter welchen Voraussetzungen eine Änderung bzw. Anpassung an die neuen Standards erforderlich ist, was zu beachten ist, wenn Abweichungen von aaRdT vereinbart werden und in welchen Fällen Ansprüche auf eine zusätzliche Vergütung entstehen.

Im vorliegenden Beitrag geht es um die Beurteilung von Leistungen, die nicht den aaRdT entsprechen, um Bedingungen für die Nachbesserung bei Änderungen nach der Abnahme und um die Höhe der Schadensersatzansprüche, wenn eine Nachbesserung zu Recht als unverhältnismäßig abgelehnt wurde.

Gesetzliche Vorgaben oder aaRdT nicht eingehalten

Sofern Leistungen nicht entsprechend den zum Abnahmezeitpunkt geltenden aaRdT erbracht worden sind, kann dies allein das Vorliegen eines Baumangels begründen. Das gilt auch dann, wenn es (noch) nicht zu einem Schaden gekommen ist [1]. Auftraggebern wird nach ständiger Rechtsprechung nicht zugemutet, dass sie abwarten, bis ein Schaden eintritt, um Mängelrechte geltend zu machen [2]. Das Risiko, die Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT nicht zu erkennen, liegt bei Planern und Ausführenden [3].

**Maßgeblicher Zeitpunkt für die Bewertung als Baumangel**

Doch sind für die Beurteilung der Mangelhaftigkeit zum Abnahmezeitpunkt auch Erkenntnisse zu berücksichtigen, die erst nach Abnahme zum Gegenstand fachlicher Auseinandersetzungen geworden sind? In der Rechtsprechung wird dies bejaht [4]. Danach gilt: Werden die zum Zeitpunkt der Abnahme geltenden Regeln der Technik nach der Abnahme als nicht mehr zutreffend erachtet und zeigt sich im Laufe der Sachmängelhaftungsfrist ein relevanter Fehler, der auf der

Berücksichtigung der zum Zeitpunkt der Abnahme geltenden, jetzt überholten aaRdT beruht, liegt gleichwohl ein die Sachmängelhaftung begründender Mangel vor [5].

Wenn keine abweichende Beschaffenheitsvereinbarung getroffen wurde, ist laut einem Urteil des OLG Nürnberg vom 23.09.2010 [6] für die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik deren Stand zum Zeitpunkt der Abnahme maßgeblich oder – sofern eine solche noch nicht erfolgt ist – der Schluss der letzten mündlichen Verhandlung in der Tatsacheninstanz. Hinsichtlich der Verwendung von objektiv untauglichen Baustoffen (ECB-Bahnen für Flachdachabdichtung) wurde festgestellt, „dass [...] die Planung auch dann mangelhaft ist, wenn ihre Fehlerhaftigkeit erst nach Abnahme aufgrund neuerer Erkenntnisse der Technik nachgewiesen werden kann.“ [7]

Konsequenz dieser Rechtsprechung ist, dass verschuldensunabhängige Nachbesserungs- oder Minderungsansprüche auch dann möglich sind, wenn sich erst nach Abnahme die zum Abnahmezeitpunkt als aaRdT zugrunde gelegten Regeln als unzutreffend herausstellen. Minderungsansprüche sollen jedoch auf die Höhe des Honorars beschränkt sein [8].

### Schadensersatzansprüche nur bei Verschulden

Schadensersatzansprüche kommen nur bei Verschulden in Betracht. Hierfür kommt es jedoch nicht auf den Ablauf der Gewährleistungfrist, sondern auf den Zeitpunkt der Planung und Durchführung des (Architekten-)Werkes an. Dabei ist zu prüfen, ob es dem Auftragnehmer nach seinem subjektiven Kenntnisstand möglich war, den Mangel rechtzeitig zu erkennen [9]. Dementsprechend verneinte das OLG Köln [10] die Haftung eines Ingenieurs für Mängel seiner Wärmeschutzberechnung unter anderem mit der Begründung, dass die nach Abnahme eingetretene DIN-Änderung nur dann für dessen Haftung von Belang ist, wenn er bereits zur Zeit der Aufstellung der Berechnung diese Änderung als anerkannte Regel der Technik hätte voraussehen und berücksichtigen müssen. Und das OLG München konstatierte mit Urteil vom 18.01.2011 [11]: „Wenn der Planer in sorgfältiger Weise alle gebotenen Erkenntnisquellen zur Kenntnis genommen und bei seiner Planung berücksichtigt hat, kann seine fehlerhafte Planung schuldlos erfolgt sein.“

### Bedingungen für die Nachbesserung

Eindeutige Position bezieht die Rechtsprechung hinsichtlich der Frage, ob nach „alten“ Bedingungen nachgebessert werden darf oder aber die zum Zeitpunkt der Nachbesserung geltenden öffentlich-rechtlichen Vorgaben und aaRdT maßgeblich sind. So urteilte jüngst das OLG Stuttgart [12] anlässlich der Frage, ob eine zum Zeitpunkt der Abnahme nach den Anforderungen der EnEV 2002 sanierte Dachdämmung aufgrund ihrer Mängelhaftigkeit nunmehr nach den Anforderungen der EnEV 2009 nachzubessern war: „Eine Mängelbeseitigung muss die zum Zeitpunkt ihrer Vornahme geltenden anerkannten Regeln der Technik und öffentlich-rechtlichen Vorschriften einhalten.“

## Zusatzkosten infolge gestiegener Anforderungen

Zusatzkosten, um die das Werk bei mangelfreier Ausführung von vornherein teurer gewesen wäre, werden als Sowieso-Kosten bezeichnet. Die im Fall der sanierten Dachdämmung beschriebenen Kosten, die infolge Änderung öffentlich-rechtlicher Anforderungen oder auch der aaRdT nach Abnahme entstehen, sind keine Sowieso-Kosten, da sie bei mangelfreier Ausführung nach den zum Abnahmepunkt geltenden Anforderungen (hier: EnEV 2002) gerade nicht entstanden wären [13]. Zusatzkosten, die durch höhere Anforderungen an die Bauausführung aufgrund einer Fortentwicklung der aaRdT oder Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben entstehen, beruhen daher vielmehr auf der Vertragsverletzung des Auftragnehmers, der zum Zeitpunkt der Abnahme kein mangelfreies Werk erstellt hat. Er hat deshalb die dadurch notwendig gewordenen Kosten zu tragen (§ 635 Abs. 2 BGB).

Daneben kommen Schadensersatzansprüche in Höhe eventueller Zusatzkosten wegen höherer öffentlich-rechtlicher Anforderungen oder wegen der Weiterentwicklung des Stands der Technik dann in Betracht, wenn der Auftragnehmer den nachzubessernden Mangel schuldhaft verursacht hat oder er schuldhaft seiner Nachbesserungspflicht nicht rechtzeitig nachgekommen ist und dadurch die Zusatzkosten entstanden sind.

## Vorteilsausgleichung bei verbleibendem Mehrwert

Ein dem Auftraggeber verbleibender Mehrwert gegenüber der ursprünglich vertraglich vereinbarten Werkleistung kann jedoch nach den Grundsätzen der Vorteilsausgleichung eine Zahlungspflicht des Auftraggebers begründen. Hierzu führt das OLG Stuttgart aus: „Hat die Weiterentwicklung der Regeln der Technik zur Folge, dass [...] ein vertraglich nicht geschuldeter Vorteil verbleibt, ist dieser auszugleichen. Damit sind die berechtigten Belange beider Vertragsparteien ausreichend gewahrt.“ So könne beispielsweise durch die Verwendung eines aufwendigeren Materials ein zusätzlicher, vertraglich nicht geschuldeter Vorteil in Form einer verlängerten Nutzungsdauer erlangt werden.

Nachbesserung unverhältnismäßig – trotzdem Schadensersatz in Höhe der Mangelbeseitigungskosten?

Wenn eine Nachbesserung jedoch zu Recht als unverhältnismäßig abgelehnt wird, stellt sich die Frage, ob der Auftragnehmer Schadensersatz in Höhe der vollen Mangelbeseitigungskosten leisten muss oder (nur) in Höhe der Verkehrswertminderung.

Noch 2005 hatte das OLG Frankfurt [14] einem Auftraggeber Schadensersatz in Höhe der Mangelbeseitigungskosten von ca. 36000 Euro zugestanden, weil Heizungsrohre nicht entsprechend der EnEV-Vorgaben gedämmt worden waren – obwohl die Heizungsmehrkosten gerechnet auf die Lebensdauer der Heizungsanlage nur 2600 DM betragen.

Zur Begründung führte das Gericht aus, dass es für den geltend gemachten Schadensersatzanspruch in Höhe der Kosten der Mängelbeseitigung grundsätzlich unerheblich sei, auch wenn die Beseitigung des Mangels wegen Unverhältnismäßigkeit des hierfür erforderlichen Aufwands verweigert werden dürfte. Die Höhe der Schadensgrenze könne zwar auch nach dem merkantilen Minderwert des Werkes bemessen werden. Der Auftraggeber sei aber hierauf nicht beschränkt, [sondern könne] grundsätzlich als Schadensersatz die Kosten der Mängelbeseitigung verlangen.

### Schadensersatz nur in Höhe der Verkehrswertminderung

In einer aktuellen Entscheidung vom 11.10.2012 befasste sich der BGH [15] nunmehr mit einem ähnlichen Sachverhalt. Im konkreten Fall ging es um die Frage, ob der Auftraggeber von Sanitärarbeiten Schadensersatz in Höhe der Nachbesserungskosten von 44 000 Euro für die Dämmung von Warmwasserleitungen verlangen kann, die mit 13 mm statt 20 mm nicht den Anforderungen der EnEV entspricht. Angesichts dieser Kosten verweigerte der Auftragnehmer die Nachbesserung mit dem Einwand der Unverhältnismäßigkeit. Die konkrete Nutzung des Gebäudes sei durch die nicht fachgerechte Dämmung der Warmwasserleitungen nicht beeinträchtigt und der mangelbedingt höhere Energieverbrauch verursache lediglich Mehrkosten von ca. 50 Euro pro Jahr.

Der BGH entschied erstmals: Wenn der Auftragnehmer die Nacherfüllung zu Recht als unverhältnismäßig verweigert, kann der Auftraggeber Schadensersatz nur in Höhe der Differenzkosten verlangen, die sich aus der mangelbedingten Verkehrswertminderung ergeben. Ziel des Schadensersatzanspruchs sei es, den verbleibenden Mangel auszugleichen, nicht jedoch Auftraggeber besserzustellen, als sie im Falle der Mängelbeseitigung stünden. Daher bestehe kein vernünftiger Grund, dem Auftragnehmer, der die Beseitigung von Mängeln wegen eines damit verbundenen unverhältnismäßigen Aufwands gemäß § 635 Abs. 3 BGB verweigern darf, gleichwohl im Wege des Schadensersatzes die Erstattung der Mängelbeseitigungskosten abzuverlangen. Damit stellte der BGH klar, dass im Rahmen der Schadenberechnung kein anderer Maßstab gelten kann, als bei Prüfung der Unverhältnismäßigkeit des Nachbesserungsaufwandes.

### Fazit

Sobald Änderungen für Planer und Ausführende erkennbar sind, müssen mögliche und gebotene Hinweise unter Berücksichtigung oben skizzierter Aspekte schriftlich erfolgen. Der Wandel technischer Regeln verlangt von Planern und Ausführenden frühzeitige Kommunikation und vor allem deren nachvollziehbare Dokumentation. Denn im Zweifelsfall gilt es zu beweisen, dass das Werk im Ergebnis von Überprüfungen, Hinweisen und Aufklärung entsprechend den Anordnungen des Auftraggebers ausgeführt worden ist.

Dass Auftraggeber gewünschte Ergänzungsleistungen definieren und explizit (schriftlich) anordnen, ist zum einen unabdingbare Voraussetzung für die Durchsetzung zusätzlicher Honoraransprüche. Zum anderen kann nur auf dieser

Grundlage wirksam einer Inanspruchnahme wegen etwaiger Mängel infolge Änderung öffentlich-rechtlicher Vorgaben oder aaRdT vorgebeugt werden.

## Quellen

- [1] OLG Frankfurt, Urteil vom 14.11.2007 – 17 U 116/06, IBR 2008, 723
- [2] So z. B. OLG Düsseldorf, Urteil vom 14.07.1995 – 22 U 46/95
- [3] Für Bauleistungen – OLG Köln vom 06.05.1991, BauR 1991, 759 und schon zuvor OLG Frankfurt, Urteil vom 27.05.1981 – 17 U 82/80 (sog. Blasbachbrückental-Fall) – Für den Bauträgervertrag: OLG Zweibrücken, Urteil vom 21.12.2006 – 4 U 12/06, IBR 2007, 264
- [4] BGH, BauR 1971, 58; OLG Hamm, Urteil vom 09.01.2003 – 17 U 91/01; BauR 2003, 567, BGH, Beschluss vom 26.08.2004 – VII ZR 64/03, IBR 2005, 33; Werner/Pastor, Der Bauprozeß, 10. Aufl., Rn 1483
- [5] BGH VII ZR 90/68, BauR 1971, 58,59
- [6] OLG Nürnberg, Urteil vom 23.09.2010 – 13 U 194/08, IBR 2011, 13
- [7] OLG Hamm, Urteil vom 09.01.2003 – 17 U 91/01, IBR 2005, 33 und IBR 2003, 204
- [8] IBR 2005, 586 unter Hinweis auf BGH BauR 1985, 567
- [9] OLG Hamm, Urteil vom 09.01.2003 – 17 U 91/01, IBR 2005, 33 und IBR 2003, 204
- [10] OLG Köln, Urteil vom 26.03.2003 – 13 U 65/02 IBR 2004, 29
- [11] OLG München, Urteil vom 18.01.2011 – 9 U 2546/10, IBR 2011, 1372
- [12] OLG Stuttgart, Urteil vom 03.07.2012 – 10 U 33/12
- [13] Vgl. zu den folgenden Ausführungen OLG Stuttgart, Beschluss vom 14.09.2011 – 10 W 9/11
- [14] OLG Frankfurt, Urteil vom 14.04.2005 – 15 U 89/99
- [15] BGH, Urteil vom 11.10.2012 – VII ZR 179/11

# $A_w$ -Wert Messung in situ – Worauf ist bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten zu achten?

Mario Stelzmann, HTWK Leipzig, TU Dresden

Robin Berg, HTWK Leipzig

Ulrich Möller, HTWK Leipzig

John Grunewald, TU Dresden

---

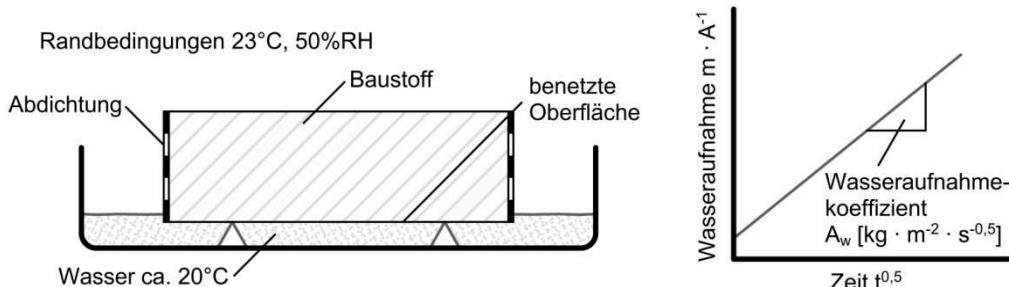
## 1 Kontext

Die zukünftig geforderten Energieeinsparungen im Gebäudebestand erfordern, für den Bereich von Gebäuden mit erhaltenswerten historischen Fassaden, das Anbringen einer Innendämmung. Eine Innendämmung verändert die bauphysikalische Funktionsweise der Außenwandkonstruktion wesentlich. Die Tauwasserebene liegt in der Konstruktion und erhöht die Gefahr einer Auffeuchtung im Bereich hinter der Dämmung. Zusätzlich verringert sich in den Wintermonaten, aufgrund der fehlenden Heizenergie, die Temperatur im Mauerwerk. Das hat eine Reduzierung des Trocknungspotenzials zur Folge. Gelangt nun Schlagregen in die innenseitig gedämmte Außenwandkonstruktion, kann diese nur noch unzureichend abtrocknen und die Fassade bleibt länger feucht. Damit steigt die Gefahr von Frostschäden. Aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge besteht eine allgemein erhöhte Anforderung an den Schlagregenschutz für nachträglich innen gedämmte Konstruktionen [1]. Für die Bewertung des vorhandenen Schlagregenschutzes bietet das WTA-Merkblatt 6-5 [3] einen allgemeinen Grenzwert an den Wasseraufnahmekoeffizienten der Fassadenbaustoffe von  $W_w \leq 0,2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}]$ , bei dem ein allgemein ausreichender Schlagregenschutz sichergestellt ist. Für einen Fassadenausschnitt von 10 cm mal 10 cm bedeutet das, bei einem Schlagregenereignis von 60 Minuten, ein maximal zulässiges Aufsaugen von insgesamt 2 g Wasser durch die Fassadenbaustoffe. Das entspricht knapp einem halben Teelöffel. Für den Nachweis des tatsächlich vorhandenen Schlagregenschutzes stellt sich die Frage nach der Fehlertoleranz und möglichen Einflussgrößen auf Messtechnologien zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten. Insbesondere bei Untersuchungen direkt an der Fassade beeinflussen Faktoren wie Ausgangsfeuchtegehalt der Fassade, Klimabedingungen oder Laterale Feuchteausbreitung die Messergebnisse z. T. erheblich. Für In situ Messungen des Wasseraufnahmekoeffizienten werden in dem folgenden Artikel exemplarisch die Einflüsse aus der Wassertemperatur und dem Materialfeuchtegehalt identifiziert und deren Effekte messtechnisch untersucht.

## 2 Der Wasseraufnahmekoeffizient $A_w$

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die kapillare Sauggeschwindigkeit von Baustoffen und gilt als Maß für deren kapillare Saugfähigkeit. Für die Beschreibung des Schlagregenschutzes von Fassadenflächen bildet er die

Schnittstelle zwischen der aus Klimadaten resultierenden Schlagregenstromdichte und der dynamischen hygrothermischen Simulationsberechnung von Fassadenbaustoffen. Als Materialkennwert definiert er sich als zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme eines Materials, an dessen Saugfläche ständig ein Wasserüberschuss vorhanden ist [4]. Für die Bewertung der Qualität des Schlagregenschutzes von Fassaden spielt der Wasseraufnahmekoeffizient die zentrale Rolle. Die DIN EN ISO 15148 [5] beschreibt das Standard-Laborverfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffproben (vgl. „Abbildung 1“). Um die seitliche Verdunstung oder den seitlichen Wassereintritt zu verhindern, sind die Seitenflächen der Proben abzudichten. Vor der Untersuchung werden die Proben auf Ausgleichsfeuchtegehalt bei Raumklima konditioniert. Die Proben werden vor dem Eintauchen und dann in bestimmten Zeitabständen gewogen. Der Versuch findet unter konstanten Umgebungsbedingungen von ca. 23 °C und 50 %RH statt. Die Auswertung der Messdaten und die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgen halbgraphisch. Dabei wird die flächenbezogene Massenzunahme über die Wurzel der Versuchsdauer in ein Diagramm eingetragen. Unter Berücksichtigung von ggf. auftretenden Unstetigkeiten zu Beginn und am Ende des Versuches wird ein linear ansteigender Bereich identifiziert. Durch eine lineare Regressionsanalyse dieses Bereiches errechnet sich der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_w$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0,5}$ ] bzw.  $W_w$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$ ].



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Wasseraufnahmeverfahrens [17]

### 3 In situ Verfahren

In der Fachwelt existieren eine Reihe von Prüfverfahren und -methoden zur Untersuchung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Der Laborversuch nach DIN EN ISO 15148 [5] stellt dabei das Referenzverfahren dar. Wesentlicher Vorteil der Labormethode gegenüber in situ Verfahren sind konstante und reproduzierbare Prüfbedingungen. Vorteile von In situ Verfahren liegen in der zerstörungsfreien und zeitsparenden Prüfdurchführung. Die im deutschsprachigen Raum am häufigsten angewendeten Prüfverfahren sind der Wassereindringprüfer nach Karsten (RILEM Tube) und die WD Prüfplatte nach Franke. Zusätzlich soll an dieser Stelle auch die noch junge Technologie des Wasseraufnahmemessgerätes (WAM) genannt werden.

### 3.1 Wassereindringprüfer nach Karsten

Der Wassereindringprüfer nach Karsten [6], auch Karstensches Prüfröhrchen genannt, ist ein in der Fachwelt weit verbreitetes Verfahren zur Untersuchung des Wassereindringverhaltens von Baustoffen. Das Prüfgerät besteht aus einer Glas- oder Kunststoffglocke mit einer  $2,5\text{cm}$  weiten Öffnung und einem daran angebrachtem Röhrchen mit aufgedruckter Messskala (vgl. „Abbildung 2“ links). Bei der Anwendung wird das Prüfgerät mithilfe eines Dichtstoffes (z. B. Silikonkautschuk, Butyl-Dichtstoff oder ölbundene Kitte etc.) an der Prüffläche wasserdicht fixiert. Mit einer Spritzflasche oder Pipette wird das Röhrchen bis zur Nullmarke mit Wasser gefüllt. Dabei entsteht ein Wasserkontakt für die Prüffläche von ca.  $5\text{cm}^2$  bei gleichzeitiger Druckeinwirkung von  $10\text{cm}$  Wassersäule ( $p_e = 980\text{Pa}$ ). Je nach den Eigenschaften des zu untersuchenden Materials oder vorhandenen Rissen sinkt der Wasserstand im Röhrchen. Dieser wird in regelmäßigen Abständen notiert und das Röhrchen wieder bis zur Nullmarke aufgefüllt. Die Durchführung einer Untersuchung beträgt üblicherweise zwischen  $15 \dots 60\text{min}$ . Für die Auswertung wird die gemessene mittlere Wasseraufnahmerate in  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$  mit vorgeschlagenen Grenzwerten verglichen [6], [7]. Weiterhin bieten Niemeyer [8] und Wendler [9] je ein Auswertungsprogramm zur Abschätzung des Wasseraufnahmekoeffizienten an.



**Abbildung 2:** Wassereindringprüfer nach Karsten (links) und WD Prüfplatte nach Franke (rechts)

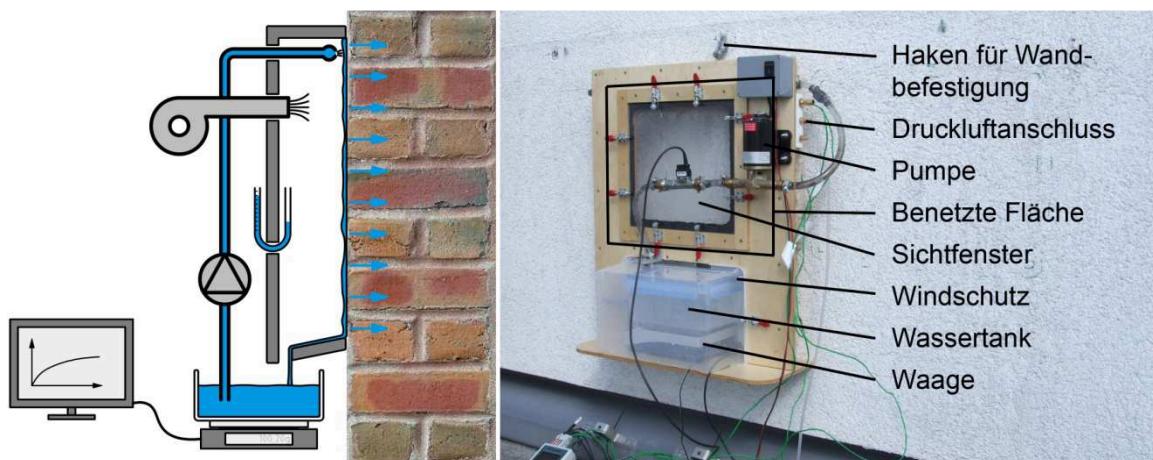
### 3.2 WD Prüfplatte nach Franke

Die WD Prüfplatte nach Franke [10] wurde zur Bemessung und Überprüfung von nachträglichen hydrophobierenden Imprägnierungen auf Sichtmauerwerkfassaden entwickelt. Mit einer Prüffläche von  $8,1\text{cm} \cdot 25,0\text{cm}$  erfasst die WD Prüfplatte in etwa einen Läuferstein im Normalformat einschließlich einer Stoß- und einer Lagerfuge. Der Prüfdruck variiert über die Höhe der Prüfplatte. Während sich im unteren Bereich ein Staudruck von ca.  $8,1\text{cm}$  ( $p_e = 800\text{Pa}$ ) aufbaut, liegt der Prüfdruck im oberen Bereich nahe null. Aufbau und Durchführung stimmen - abgesehen von der größeren Prüffläche - im Wesentlichen mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten überein. Franke berechnet den Wasseraufnahmekoeffizienten aus Daten der WD Prüfplatte analog dem

Laborversuch als eingedrungene Wassermenge je Prüffläche und Wurzel der Versuchsdauer zu  $W_w [kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-0,5}]$ .

### 3.3 Wasseraufnahmemessgerät

Die prinzipielle Funktionsweise des Wasseraufnahmemessgerätes (WAM) [11] ist in „Abbildung 3“ (links) dargestellt: Zunächst wird die etwa 60 cm mal 70 cm große Konstruktion über eine Konsole am Gerüst oder über einen Haken an der Fassade befestigt. Mithilfe einer dauerelastischen Dichtungsmasse wird der Geräterahmen wasserdicht am zu untersuchenden Fassadenbereich angeschlossen. Der erfasste Fassadenausschnitt mit einer Größe von  $40cm \cdot 51cm$  wird nun über einen Zeitraum von einer Stunde künstlich beregnet. Dabei wird Wasser aus dem Wassertank über ein perforiertes Rohr auf die Fassade geführt. Je nach Qualität der Fassade wird ein Teil des Wassers von den Fassadenbaustoffen aufgesaugt oder dringt über Risse ein. Der Rest fließt über eine Öffnung zurück in den Wassertank. Es besteht ein Kreislauf, den das Wasser nur über die Fassadenoberfläche verlassen kann. Ein seitlich angebrachter Ventilator erzeugt je nach eingestellter Drehzahl einen konstanten Überdruck von  $50Pa$  bis  $200Pa$  auf die Prüffläche. Dabei wird Wasser auch in kleine Risse in der Fassadenoberfläche gedrückt. Das Gewicht des Wasserbehälters wird durch eine Waage mit Datenanschluss kontinuierlich aufgezeichnet. Aus dem Masseverlust des Wasserbehälters wird auf die vom Fassadenbereich aufgenommene Wassermenge geschlossen. Der Wasseraufnahmekoeffizient der Probefläche wird aus der mittleren Wasseraufnahmerate in  $kg \cdot m^{-2}$  geteilt durch die Wurzel der Versuchsdauer in  $h^{0,5}$  oder  $s^{0,5}$  analog zur DIN EN ISO 15148 [5] bestimmt.

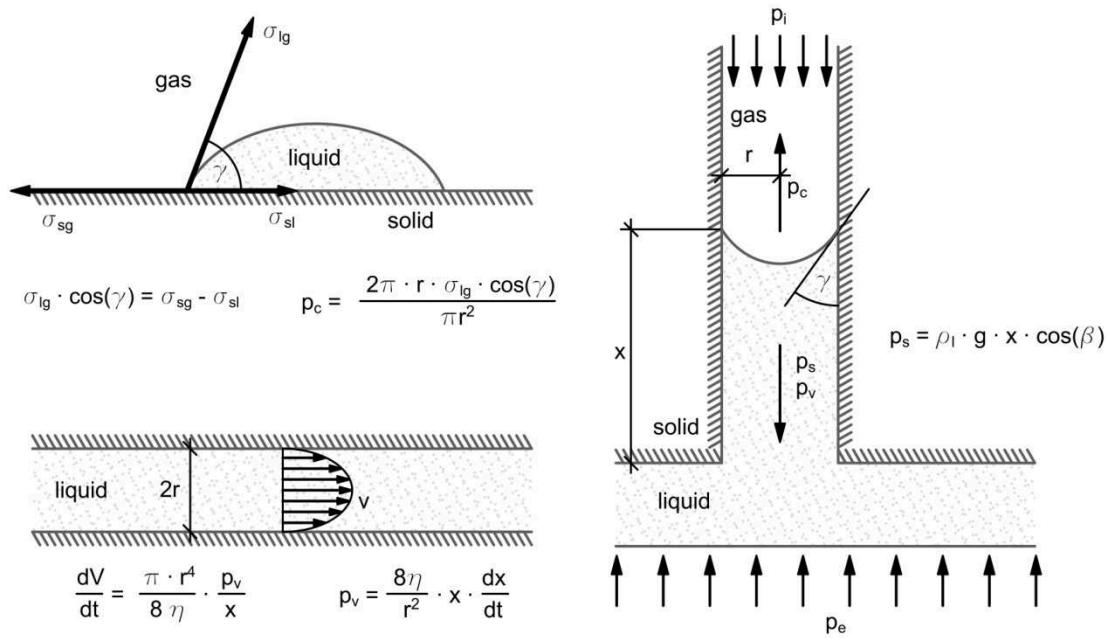


**Abbildung 3:** Wasseraufnahmemessgerät Prinzipskizze (links) und Foto des Prototypen mit Legende (rechts)

### 4 Modell der Einzelkapillare

Der Wasseraufnahmekoeffizient stellt einen Sonderfall in der Theorie des Flüssigwassertransports in porösen Medien dar. Er beschreibt das kapillare Saugverhalten ohne vorhandenen Feuchtegehaltsgradienten. Die treibenden und bremsenden Kräfte werden maßgeblich von deren Stoffeigenschaften, dem Porenraum, den Wassereigenschaften und den umgebenden Randbedingungen

bestimmt. Die thermodynamisch exakte rechnerische Beschreibung des Kapillartransports in porösen Stoffen ist u. a. aufgrund der Komplexität der Porenraumgeometrie und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Phasen nur näherungsweise möglich. Für die Beschreibung der grundlegenden Zusammenhänge wird folgend das Porenmodell der kreiszylindrischen Kapillarröhre mit konstantem Radius herangezogen [12], [13], [14], [15], [16], [17]. „Abbildung 4“ zeigt schematisch die Definition der verschiedenen Drücke, die beim Kapillartransport in einer Einzelkapillare wirken.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung des Porenmodells der kreiszylindrischen Kapillarröhre mit konstantem Radius nach [12], [13], [14], [15], [16], [17]

**Tabelle 1:** Symbole und Bezeichnungen die folgend im Wesentlichen verwendet werden.

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$A_w$	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg · m <sup>-2</sup> · s <sup>-0,5</sup> ]
$W_w$	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg · m <sup>-2</sup> · h <sup>-0,5</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung	[m · s <sup>-2</sup> ]
$m$	Flächenbezogene Masse	[kg · m <sup>-2</sup> ]
$m_\theta$	Flächenbezogene Masse mit Einfluss aus Ausgangsfeuchtegehalt	[kg · m <sup>-2</sup> ]
$m_\vartheta$	Flächenbezogene Masse mit Einfluss aus Temperatur	[kg · m <sup>-2</sup> ]
$p_c$	Kapillardruck	[Pa]
$p_e$	Äußerer Druck	[Pa]
$p_i$	Innerer Druck	[Pa]
$p_s$	Hydrostatischer Druck	[Pa]
$p_v$	Strömungsdruck	[Pa]
$r$	Kapillarradius	[m]
$t$	Saugzeit	[s] bzw. [h]

Formel-zeichen	Bezeichnung	Einheit
$x$	Wassereindringtiefe	[m]
$\beta$	Winkel der geneigten Kapillare	[°]
$\gamma$	Benetzungswinkel	[°]
$\eta$	Dynamische Viskosität von Wassers	[kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\theta_{cap}$	Kapillarer Wassergehalt	[m <sup>3</sup> · m <sup>-3</sup> ]
$\theta$	Wassergehalt	[m <sup>3</sup> · m <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	Dichte des Wassers	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Oberflächenspannung von Wassers	[N · m <sup>-1</sup> ]

#### 4.1 Herleitung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Für die Beschreibung des Wasseraufnahmekoeffizienten gilt nach Lykow [18] basierend auf dem Kräftegleichgewicht in einer Einzelkapillare folgende allgemeine Differentialbeziehung:

$$\rho_l \cdot x \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \rho_l \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \frac{8 \cdot \eta}{r^2} \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} + \rho_l \cdot g \cdot x \cdot \cos \beta - \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos (\gamma)}{r} = 0 \text{ [Pa]} \quad (1)$$

Die ersten beiden Glieder beschreiben den Trägheits- und Geschwindigkeitsdruck und können nach [18] für geringe Sauggeschwindigkeiten vernachlässigt werden. Bei geringen Saughöhen und beim waagerechten Saugen kann ebenfalls der Einfluss aus hydrostatischem Druck  $p_s$  im vierten Glied vernachlässigt werden. Bei gleichzeitiger Vernachlässigung von ggf. auftretenden innerem  $p_i$  und äußerem Druck  $p_e$  (vgl. „Abbildung 4“) stellt sich ein Gleichgewicht aus Kapillardruck  $p_c$  und Strömungsdruck  $p_v$  ein [17]:

$$p_v - p_c = 0 \quad \text{[Pa]} \quad (2)$$

$$\frac{8 \cdot \eta}{r^2} \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} - \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos (\gamma)}{r} = 0 \quad \text{[Pa]} \quad (3)$$

Durch Integration mit der Anfangsbedingung

$$x = 0 \text{ für } t = 0$$

ergibt sich durch Umstellen nach der Eindringtiefe

$$x = \sqrt{\frac{r \cdot \sigma \cdot \cos (\gamma) \cdot t}{2 \cdot \eta}} \quad \text{[m]} \quad (4)$$

Im Sinne des Wasseraufnahmekoeffizienten wird nun die Eindringtiefe durch die flächenbezogene Masse des aufgenommenen Wassers ersetzt:

$$m = \left[ \rho_w \cdot (\theta_{cap} - \theta) \cdot \sqrt{\frac{r \cdot \sigma \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \eta}} \right] \cdot \sqrt{t} \quad [kg \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

Das Wasseraufnahmeverperiment wird dabei von dem Kapillarradius, der Oberflächenspannung des Wassers, dem Benetzungswinkel des Baustoffes, der dynamischen Viskosität des Wassers, der Wasserdichte und dem kapillaren Wassergehalt beschrieben. Nach Gleichung 5 steigt die Eindringtiefe linear zur Wurzel der Saugzeit, in der Literatur auch als  $\sqrt{t}$ -Gesetz bezeichnet [19], [20]. Aufgrund von komplexen Porenraumgeometrien poröser Medien erscheint eine physikalische Lösung von Gleichung 5 als nicht zielführend. Schwarz [4] definierte den Ausdruck in eckigen Klammern aus Gleichung 5 als die Materialkonstante Wasseraufnahmekoeffizient  $A_w$ .

$$m = A_w \cdot \sqrt{t} \quad [kg \cdot m^{-2}] \quad (6)$$

## 4.2 Einfluss der Wassertemperatur

Wie in Gleichung 5 dargestellt, wird das kapillare Saugen durch die Wassereigenschaften Oberflächenspannung und dynamische Viskosität beeinflusst. Der Einfluss aus der Dichte des Wassers wird an dieser Stelle vernachlässigt. Sowohl die Oberflächenspannung als auch die dynamische Viskosität ändern sich mit der Wassertemperatur. Bezogen auf die In situ Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten könnte die Temperatur variieren. Bei Untersuchungen in den Wintermonaten kann sich das Wasser abkühlen und bei direkter Sonneneinstrahlung im Sommer deutlich erwärmen. Bei Kenntnis der Wassertemperatur kann dessen Einfluss nachträglich berücksichtigt werden. Unter Annahme einer Referenztemperatur kann Gleichung 6 basierend auf [21] und [22] erweitert werden zu

$$m_\vartheta = A_w \cdot \sqrt{t} \cdot \left[ \sqrt{\frac{\sigma \cdot \eta_{ref}}{\sigma_{ref} \cdot \eta}} \right] \quad [kg \cdot m^{-2}] \quad (7)$$

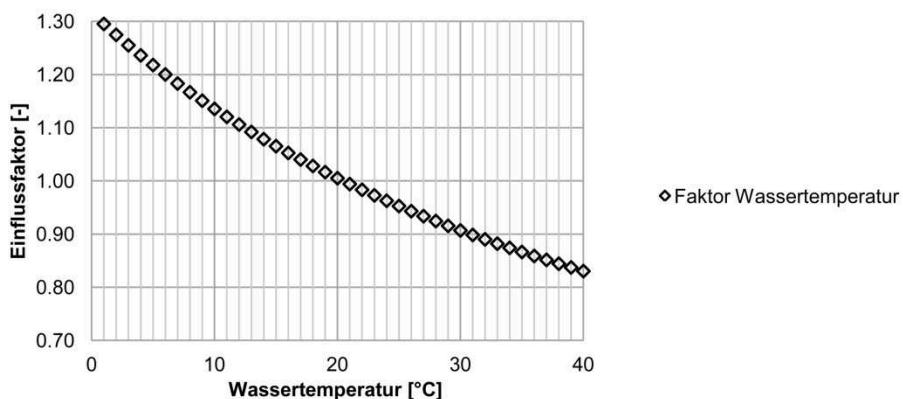
In [23], [24] und [25] sind verschiedene Näherungsgleichungen für den Einfluss der Temperatur auf die Wassereigenschaften, unter anderem für die Oberflächenspannung und die dynamische Viskosität gegenübergestellt. Die Oberflächenspannung des Wassers ergibt sich nach [25] in Abhängigkeit der Temperatur  $\vartheta$  [ $^{\circ}C$ ] zu

$$\sigma = 0,2358 \left( 1 - \frac{\vartheta + 273,15}{647,098} \right)^{1,256} \left[ 1 - 0,625 \left( 1 - \frac{\vartheta + 273,15}{647,098} \right) \right] \quad [kg \cdot s^{-2}] \quad (8)$$

und die dynamische Viskosität ergibt sich nach [23] und [24] zu

$$\eta = 4,2844 \cdot 10^{-5} + [0,157(\vartheta + 64,993)^2 - 91,296]^{-1} \quad [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}] \quad (9)$$

Die folgende „Abbildung 5“ zeigt den Ausdruck in eckigen Klammern aus Gleichung 7 für verschiedene Wassertemperaturen. Als Referenztemperatur wurde dabei  $\vartheta_{ref} = 20^\circ\text{C}$  festgelegt. Es zeigt sich, dass bereits bei geringen Temperaturunterschieden ein spürbarer Einfluss auf den Kapillartransport besteht. Demnach würde eine Fassade bei einem Schlagregenereignis an einem kalten Wintertag (mittlere Wassertemperatur 5 °C) gegenüber einer im Sommer aufgeheizten Fassade (mittlere Wassertemperatur 30 °C) Regenwasser um circa 35 % langsamer aufsaugen. Diesen Effekt gilt es entsprechend auch bei der Untersuchung des Wasseraufnahmekoeffizienten in situ zu berücksichtigen.

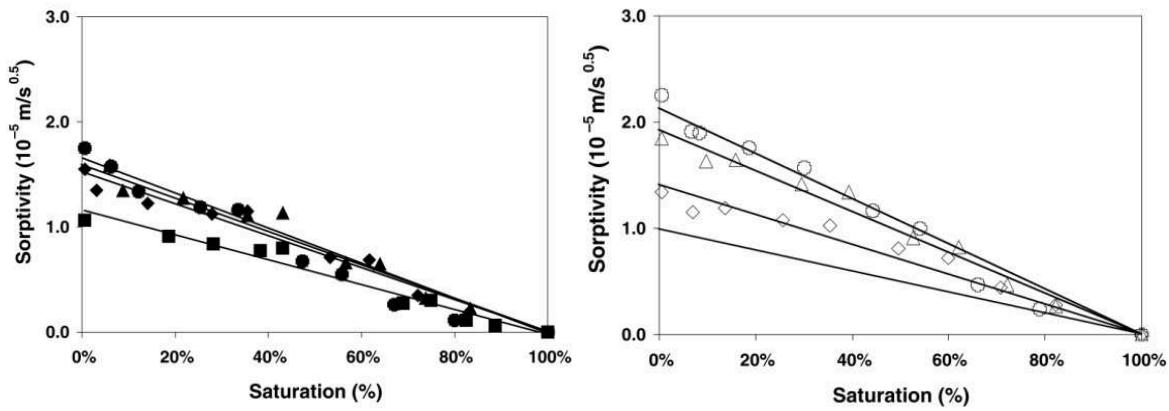


**Abbildung 5:** Einfluss der Wassertemperatur auf die Untersuchung des Wasseraufnahmekoeffizienten

#### 4.3 Einfluss des Ausgangsfeuchtegehaltes

Eine weitere Einflussgröße resultiert aus dem Ausgangsfeuchtegehalt der Fassadenbaustoffe. Kurz nach einem Schlagregenereignis sind die Kapillaren z. T. noch mit Wasser gefüllt. Würde der Wasseraufnahmekoeffizient einer Fassade mit erhöhtem Ausgangsfeuchtegehalt in situ bestimmt, würde – gegenüber einer Untersuchung des trockenen Zustandes – deutlich weniger Wasser eindringen. Das Resultat ist eine Unterschätzung des Wasseraufnahmekoeffizienten. In Schwarz 1972 und Nokken & Hooton 2002 [4], [26] wurden u. a. der Einfluss von verschiedenen Wassergehalten auf die Untersuchung des Wasseraufnahmekoeffizienten für verschiedene Materialien untersucht. Hier zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad und Wasseraufnahme- bzw. Wassereindringkoeffizient (vgl. „Abbildung 6“). Jedoch ist mit einem erhöhten Wassergehalt i. d. R. auch ein vorhandener Feuchtegradient verbunden, was eine nachträgliche rechnerische Berücksichtigung erschwert. Hinzu kommt, dass beim kurzzeitigen (Minuten und Stunden) kapillaren Saugen vorrangig größere Kapillarradien aufgrund des geringeren Strömungsdruckes  $p_s$  wirken. Hingegen bei der langfristigen (Tage und Wochen) Feuchtespeicherung verstärkt über kleinere Kapillarradien – aufgrund des größeren Kapillardruckes  $p_c$  – erfolgt. Entsprechend erscheint eine rechnerische Berücksichtigung des Ausgangsfeuchtegehalts bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in situ als nicht zielführend. Dennoch stellt ein vorhandener Ausgangsfeuchtegehalt der Fassadenbaustoffe einen wesentlichen Nachteil der In situ Messung gegenüber der Laboruntersuchung dar. Betrachtet man jedoch ausschließlich kurze Benetzungszeiten von  $t \leq 1[h]$  und

Wasseraufnahmekoeffizienten von  $W_w = 0,2 \dots 2,0 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}]$  werden bei Schlagregenereignissen bzw. in situ Messungen des Wasseraufnahmekoeffizienten lediglich Eindringtiefen von  $x = 1 \dots 10 [\text{mm}]$  erreicht. Untersuchungen in Krischer 1956 [15] und Scheffler 2009 [27] haben gezeigt, dass die Trocknungsdauer der ersten Millimeter insbesondere von den umgebenden Randbedingungen und weniger von den Baustoffeigenschaften abhängen, wobei die Trocknungsdauer proportional mit dem Quadrat der Eindringtiefe steigt  $t_{Tr} \sim x^2$ . Das bedeutet, die Untersuchung einer Fassade mit einem besonders niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten ist deutlich unempfindlicher gegenüber vergangener Schlagregenereignisse als solche mit einem erhöhten Wasseraufnahmekoeffizienten. Für die Abschätzung der Qualität einer in situ Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten sollte zuvor dennoch der Ausgangsfeuchtegehalt der Fassade – zumindest qualitativ – geprüft werden.



**Abbildung 6:** Messtechnisch bestimmter Einfluss des Sättigungsgrades auf die Bestimmung des Wassereindringkoeffizienten von verschiedenen Betonen aus [26]

## 5 Experimentelle Untersuchungen

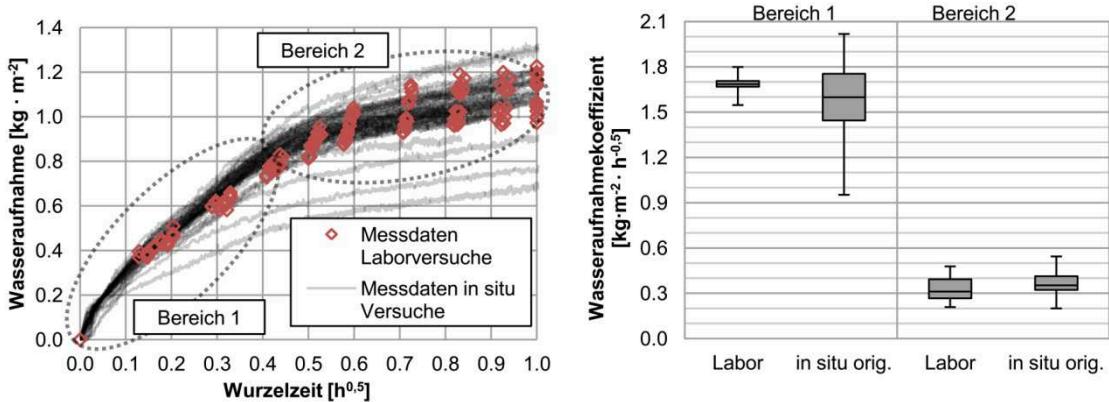
Für die experimentelle Untersuchung von den unter Punkt 4.2 und 4.3 ausgearbeiteten Einflussgrößen auf das kapillare Saugen werden nun in situ und Laborversuche an einer Fassade durchgeführt. Als Untersuchungsobjekt dient ein im Jahr 2003 aufgebrachtes Wärmedämmverbundsystem mit Dünnschichtputzsystem, bestehend aus einem mineralischen Armierungsputz mit Gewebeeinlage  $d = 3\text{mm}$  und einem organischen Silikatputz als Scheibenputz  $d = 3\text{mm}$  (vgl. Schnitt in „Abbildung 7“ links). Die nach Westen (Wetterseite) ausgerichtete Fassade befindet sich in exponierter Lage auf dem Dach des vierstöckigen Laborgebäudes der HTWK Leipzig. Aufgrund von Abwaschungen aus vergangenen Schlagregenereignissen liegt die Kornstruktur des Oberputzes teilweise frei (vgl. „Abbildung 7“ mitte). Im Zeitraum von April 2016 bis Januar 2017 wurde der Wasseraufnahmekoeffizient des Putzsystems in regelmäßigen Zeitabständen an verschiedenen Messstellen in situ bestimmt. Hierfür kam die Technologie des Wasseraufnahmemessgerätes [11] insgesamt 42 Mal an 8 verschiedenen Messstellen zum Einsatz. Bei den In situ Untersuchungen wurden etwa ein Drittel der Messungen binnen 24 Stunden nach einem Regenereignis durchgeführt. Ferner erfolgten die Messungen bei verschiedenen

Außenlufttemperaturen in einem Bereich von  $0^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 35^{\circ}\text{C}$ . Bei den Untersuchungen wurde zusätzlich die Wassertemperatur während der in situ Messungen aufgezeichnet. Ferner erfolgte die Messung von Wetterdaten während des gesamten Zeitraumes (vgl. Wetterstation in „Abbildung 8“ rechts). Als Referenz wurden Messungen des Wasseraufnahmekoeffizienten an entnommenen Proben im Labor gemäß [5] durchgeführt.



**Abbildung 7:** Untersuchtes WDVS-Dünnschichtputzsystem in exponierter Lage, Schnitt (links), Oberfläche (mitte) und Ansicht (rechts)

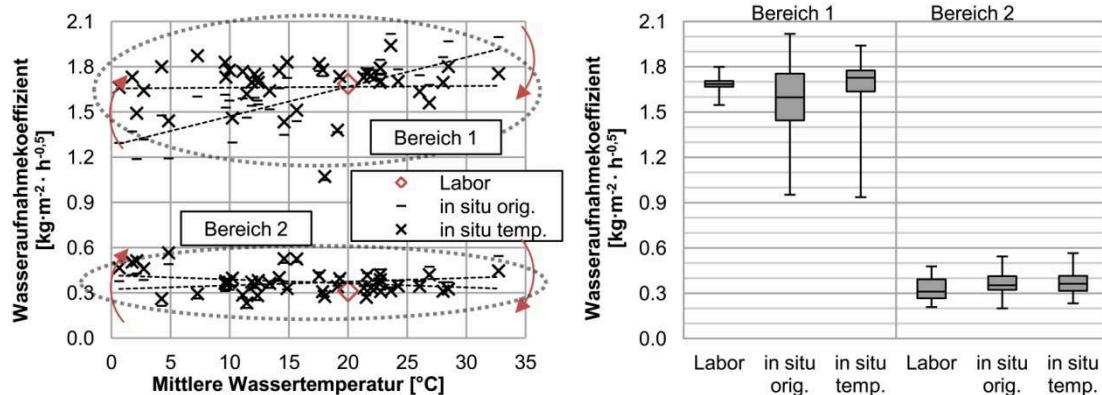
Bei der Untersuchung des Wasseraufnahmekoeffizienten des betrachteten Putzaufbaus – bestehend aus Ober- und Unterputz – ergeben sich zwei Saugbereiche (vgl. „Abbildung 8“ links). Im ersten Bereich nimmt der Oberputz rasch Feuchtigkeit auf. Dabei entsteht der Bereich 1, in dem sich die Wasseraufnahme linear zur Wurzel der Zeit darstellt. Bei Erreichen der Grenzschicht zwischen Ober- und Unterputz durch die eindringende Wasserfront reduziert sich die Wasseraufnahmerate stetig bis zum Erreichen eines zweiten linearen Bereiches. Dieser Bereich 2 steht in Abhängigkeit der Materialeigenschaften des Unterputzes. Die mittlere Neigung der Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit im Bereich 1 ergibt somit den Wasseraufnahmekoeffizienten des Oberputzes und für den Bereich 2 den des Unterputzes. Der Zeitpunkt des Bereichswechsels wird dabei maßgeblich durch die Dicke des Oberputzes beeinflusst und wird im Rahmen dieser Untersuchungen nicht weiter betrachtet. „Abbildung 8“ (links) zeigt den Verlauf der Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit für beide Bereiche aller gemessenen Einzeluntersuchungen. Der Übergang vom ersten zum zweiten Saugbereich bewegt sich zwischen  $0,4 \dots 0,6 h^{0,5}$ . In „Abbildung 8“ (rechts) sind die daraus bestimmten Wasseraufnahmekoeffizienten aus Labor- und In situ Messungen beider Bereiche gegenüber gestellt. Die Darstellung zeigt den gesamten Wertebereich mit 50%-Quantil und Zentralwert der Wasseraufnahmekoeffizienten (Boxplot). Ergebnisse aus Einzelmessungen, die weit vom Mittelwert abweichen, wurden bewusst in die Betrachtungen einbezogen. Im Bereich 1 zeigen sich große Unterschiede in den Ergebnissen aus Labor und in situ Messungen. Für den Bereich 2 hingegen resultieren vergleichbare Ergebnisse.



**Abbildung 8:** Originale Daten aller 18 Labor- und 42 In situ Messungen in der Darstellung Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit (links) und den daraus bestimmten Wasseraufnahmekoeffizienten der Bereiche 1 und 2 (rechts)

### 5.1 Einfluss aus der Wassertemperatur

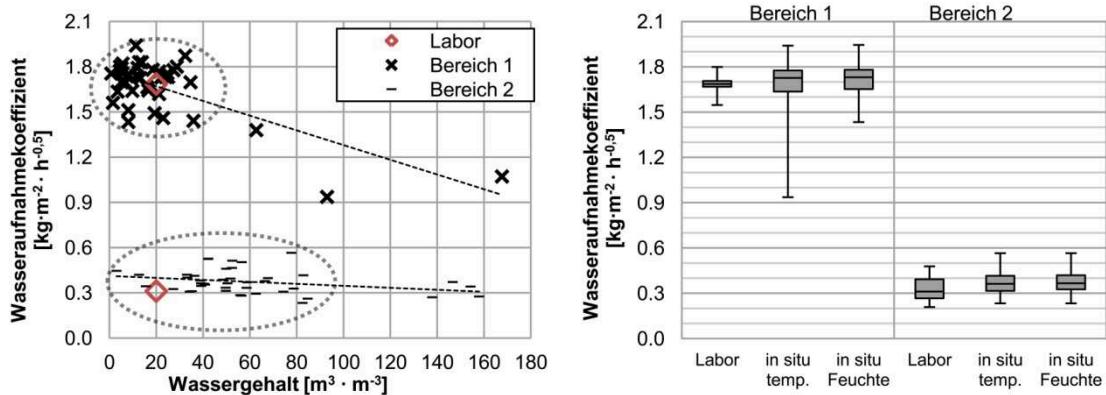
Wie aus Punkt 4 hervorgeht, wird das kapillare Saugen durch die Wassertemperatur beeinflusst. Im Laborversuch erfolgten die Prüfungen bei konstanter Wasser- und Probentemperatur von 20°C. Bei In situ Versuchen an der Fassade kann die Wassertemperatur in Abhängigkeit der äußeren Klimabedingungen variieren. In „Abbildung 9“ (links) sind die Wasseraufnahmekoeffizienten beider Bereiche aller in situ Einzelmessungen in Abhängigkeit der mittleren Wassertemperatur während der Untersuchungen in einem Diagramm dargestellt (Querstriche). Durch Anwendung von Gleichung 7 wurden diese gemessenen Daten anschließend auf eine Referenztemperatur von  $\vartheta_{ref} = 20^\circ\text{C}$  verändert (Kreuze). Insbesondere bei den Ergebnissen des Bereichs 1 zeigt sich deutlich ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und gemessenen Wasseraufnahmekoeffizienten (Trendgeraden in „Abbildung 9“ (links)). „Abbildung 9“ (rechts) zeigt den Boxplot für Wasseraufnahmekoeffizienten des Laborversuches, des in situ Versuches ohne sowie mit Berücksichtigung des Temperatureinflusses. Da im Rahmen des Versuchsprogrammes häufiger Untersuchungen bei kalten als bei wärmeren Außenlufttemperaturen durchgeführt wurden, steigt der Zentralwert der nachträglich temperaturkompensierten In situ Ergebnisse leicht an. Die Anwendung von Gleichung 7 zeigt bei den vorliegenden Untersuchungen in etwa eine Halbierung des 50%-Quantil für den Bereich 1. Gleichzeitig zeigt sich eine höhere Übereinstimmung der Laborergebnisse mit den temperaturkompensierten In situ Messergebnissen. Für die Ergebnisse des Bereiches 2 ergeben sich nur geringe Unterschiede.



**Abbildung 9:** Messergebnisse des Wasseraufnahmekoeffizienten ohne bzw. mit Temperaturkompensation in Abhängigkeit der mittleren Wassertemperatur, Übersicht aller Ergebnisse (links) und Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Laborversuch, des In situ Versuches ohne sowie mit Berücksichtigung des Temperatureinflusses (rechts)

## 5.2 Einfluss des Ausgangsfeuchtegehalts

Die unter Punkt 5.1 temperaturkorrigierten In situ Messdaten werden nun auf den Einfluss der Feuchte aus vergangenen Regenereignissen hin untersucht. Hierfür werden die Messdaten der an der untersuchten Fassadenfläche befindlichen Wetterstation herangezogen. Mithilfe der hygrothermischen Simulationssoftware Delphin [28] wurde ein Simulationsmodell des Wandaufbaus erstellt. Materialdaten des Dünnschichtputzsystems wurden auf Grundlage von vergleichbaren Wasseraufnahmekoeffizienten aus der Materialdatenbank ausgewählt. Als Eingangsdaten dienten die im Untersuchungszeitraum kontinuierlich gemessene Oberflächentemperatur des Putzes, Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte sowie Regen- und Winddaten. Ausgegeben wurden die mittleren Wassergehalte des Ober- und des Unterputzes zu den jeweiligen Zeitpunkten der 42 In situ Messungen. Diese generierten Ausgangsfeuchtedaten liefern grobe Anhaltspunkte über den tatsächlichen Feuchtegehalt der einzelnen Putzschichten. In „Abbildung 10“ (links) sind die in situ gemessenen Wasseraufnahmekoeffizienten über die simulierten Ausgangsfeuchtegehalte der jeweiligen Putzschicht aufgetragen. Die Daten zeigen, insbesondere bei den Ergebnissen des Bereiches 1, den prinzipiellen Zusammenhang aus sinkendem Wasseraufnahmekoeffizienten bei steigendem Ausgangsfeuchtegehalt. Entfernt man die Ausreißer mit erhöhten Feuchtegehalten (Markierungen in „Abbildung 10“ links), reduziert sich der Wertebereich im Boxplot des Bereiches 1 um knapp die Hälfte (vgl. „Abbildung 10“ rechts). Der untersuchte Effekt fällt im Bereich 2 nur gering aus.



**Abbildung 10:** Messergebnisse des Wasseraufnahmekoeffizienten in Abhängigkeit des mittleren Ausgangsfeuchtegehalts, Übersicht aller Ergebnisse (links) und Zusammenfassung der Ergebnisse und Gegenüberstellung mit Ergebnissen des Laborversuch, des In situ Versuches mit Berücksichtigung des Temperatureinflusses (rechts)

## 6 Schlussfolgerungen

Die Bewegung von flüssigem Wasser in porösen Baustoffen ist ein komplexer Vorgang. Das Wasseraufnahmeeperiment beschreibt die Flüssigwasseraufnahme für den Fall ohne einen vorhandenen Feuchtegehaltsgradienten im Baustoff. Stark vereinfacht kann dieser Versuch auf ein Kapillarröhrenmodell übertragen werden. Die dabei auf die Wasserbewegung in einer Einzelkapillare wirkenden Einflussgrößen können so bedingt wiederum auf das Wasseraufnahmeeperiment und den daraus resultierenden Wasseraufnahmekoeffizienten abstrahiert werden. Insbesondere bei der In situ Messung zeigen sich relevante Einflussgrößen, die beim Laborexperiment in dieser Größenordnung nicht auftreten. Diese lassen sich in drei prinzipielle Gruppen unterteilen:

- Effekte, die direkt auf den Transport von flüssigem Wasser im Material wirken, wie z. B. die Wassertemperatur, der Ausgangsfeuchtegehalt des Stoffes oder der eingesetzte Prüfdruck
- Effekte, die aus dem eingesetzten Prüfverfahren resultieren, wie z. B. laterale Verteilungseffekte des In situ Verfahrens, Ungenauigkeiten der Prüfmethode, die Prüfdauer oder der verwendete Auswertungsalgorithmus
- Unterschiede in den Materialeigenschaften über die Fassadenfläche.

Speziell die Einflüsse aus der Wassertemperatur und dem Ausgangsfeuchtegehalt wurden im Rahmen von In situ Messungen an einer Putzfassade untersucht. Die Messergebnisse zeigen, dass

- bei besonders hohen oder niedrigen Wassertemperaturen dessen Einfluss nachträglich berücksichtigt werden kann
- ein erhöhter Ausgangsfeuchtegehalt das Messergebnis einer In situ Messung beeinflusst.

Dies kann durch die zusätzliche Bestimmung der Wassertemperatur und des Feuchtegehaltes der Fassadenbaustoffe bzw. die ausreichend lange Dauer seit dem vergangenen Schlagregenereignis erfolgen. Ferner zeigen die experimentellen Untersuchungen exemplarisch, dass Ergebnisse aus

Laboruntersuchungen mit denen aus In situ Messungen bedingt vergleichbare Resultate liefern können. Ferner unterstreichen die Messdaten die Bedeutung der Kenntnis über den Kurvenverlauf der Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit. So besteht das untersuchte Dünnschichtputzsystem die Anforderungen an einen wasserabweisenden Schlagregenschutz nach DIN 4108-3 [29] mit einem  $W_w \leq 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$  nur durch die Auswahl des Bereiches 2.

## Literatur

- [1] Stelzmann, M., Möller, U., Plagge, R., Grunewald, J., Abstimmung zwischen Innendämmung und Schlagregenschutz am Beispiel der Elbphilharmonie, 3. Internationaler Innendämmkongress vom 19. bis 20. Juni 2015 in Dresden, Tagungsunterlagen, Grunewald, J., Plagge, R. (Hrsg.), Dresden: TU-Dresden, Institut für Bauklimatik, 2015, S. 78-89.
- [2] WTA-Merkblatt 6-4-09/D: Innendämmung nach WTA I. Mai 2009.
- [3] WTA-Merkblatt 6-5-14/D: Innendämmung nach WTA I. April 2014.
- [4] Schwarz, B., Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur 93 (7), 1972, S.206–211.
- [5] DIN EN ISO 15148:2016-12 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. Beuth, Berlin 91.100.01, 20 pp.
- [6] Karsten, R., Bauchemie für Schule und Baupraxis. Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1960.
- [7] Dahmen, G., Wasseraufnahme von Sichtmauerwerk, Prüfmethoden und Aussagewert, 1989, S. 7 pp.
- [8] Auras, M., Leitfaden Naturstein-Monitoring: Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2011, S. 301 pp.
- [9] Wendler, E., Snethlage, R., Der Wassereindringprüfer nach Karsten: Anwendung und Interpretation der Meßwerte. Bautenschutz + Bausanierung 12, 1989, S. 110–115.
- [10] Franke, L., Kittl, R., Witt, S., Hydrophobierung von Fassaden - eine sinnvolle Maßnahme? Bauphysik 9 (5), 1987, S. 181–187.
- [11] Möller, U., Stelzmann, M., 2013. In-Situ-Messgerät für die zerstörungsfreie Messung der Wasseraufnahme, in: , 2. Internationaler Innendämmkongress. Tagungsunterlage. Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, Dresden, pp. 188–197.
- [12] Young, T., An essay on the cohesion of fluids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 95, 01.1805, S. 65–87.
- [13] Laplace, P.S., Sur L'action Capillaire, Traité de Mécanique Céleste, volume 4, Supplément au dixième livre du Traité de Mécanique Céleste, Paris, 1805, S. 1–79
- [14] Poiseuille, J.L.M., Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres, Paris, 1846.
- [15] Krischer, O., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, 1956.
- [16] Cammerer, W.F., Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern. VDI-Forschungsheft (500), 1963, 5–27.

- [17] Klopfer, H., Lehrbuch der Bauphysik, Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand Klima, 3. Auflage, Kapitel 3 – Feuchte, B. G. Teubner Stuttgart, 1994, S. 271–395.
- [18] Lykow, A.W., Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern, Akademieverlag, Berlin, 1958.
- [19] Kozeny, J., Über kapillare Leitung des Wassers im Boden: Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung. Sitzungsbereich Abteilung Ila der mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse der Wiener Akademie der Wissenschaften (136), 1927, S. 271–306.
- [20] Künzel, H., Der kritische Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur 95 (6), 1974, S. 241–246.
- [21] Kießl, K., Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen: Rechnerische Erfassung u. bauphysikalische Anwendung. s.n.], [S.I., 1983, 124 S.
- [22] Guizzardi, M., Derome, D., Carmeliet, J., Water uptake in clay brick at different temperatures: Experiments and numerical simulations. Journal of Building Physics 39 (4), 2015, p. 373–389.  
doi:10.1177/1744259115578227.
- [23] Sharqawy, M.H., Lienhard, J.H., Zubair, S.M., Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16 (1-3), 2010, S. 354–380. doi:10.5004/dwt.2010.1079.
- [24] IAPWS, Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance, Berlin, 2008.
- [25] IAPWS, Revised Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance, Moscow, 2014.
- [26] Nokken, M.R.& Hooton, R.D., Dependence of Rate of Absorption on Degree of Saturation of Concrete. Cement, Concrete, and Aggregates CCAGDP 24 (1), 2002, 20–24.
- [27] Scheffler, G.A. & Plagge, R., Ein Trocknungskoeffizient für Baustoffe. Bauphysik 31 (3), 2009, S. 125–138. doi:10.1002/bapi.200910018.
- [28] Nicolai A., J. Grunewald, R. Plagge & G. Scheffler, Development of a Combined Heat, Moisture, and Salt Transport Model for Unsaturated Porous Building Materials. In Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G. Deckelmann & R. Espinosa-Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, 2010, S. 67-84.
- [29] DIN 4108-3:2014-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth, Berlin 91.120.10; 91.120.30, 77 pp.

# Schadensfreie Hydrophobierung

Jens Engel, Remmers GmbH

---

## 1 Einleitung

Die wasserabweisende Ausrüstung von Fassadenoberflächen durch Behandlung mit entsprechenden Imprägnierungen ist kein neues Thema. Seit vielen Jahrzehnten werden Imprägniermittel auf unterschiedlicher Wirkstoffbasis dazu verwendet, mineralische Baustoffe - möglichst ohne ihre optische Erscheinung zu verändern - wasserabweisend auszurüsten. Man sollte meinen, dass dieses Thema, unterstützt durch wissenschaftliche Untersuchungen und Diskussionen schon so weit transparent gemacht wurde, dass kaum mehr Unklarheiten bzgl. des Wann?, Wo? und Wie? einer solchen Maßnahme bestehen. Dies ist nicht so! Die Praxis zeigt, dass die Diskussionen um Indikationen und Gegenindikationen einer hydrophobierenden Imprägnierung in vielen Fällen aufs Neue geführt werden; häufig getrieben durch die nicht belegte Behauptung, dass Hydrophobierung zwar schadensverhindernd wirken können, aber auch selbst Schäden auslösen. In einigen Fällen früher Hydrophobierungen – vorwiegend bei Maßnahmen der 1980er und 1990er Jahre – liegen heute tatsächlich Schäden vor. Obwohl die Schwierigkeit jedoch darin besteht, zu bewerten ob ein Schadensbild auf die Hydrophobierung zurückzuführen ist oder auf andere Begleitumstände, kann man aus diesen Fällen Randbedingungen ableiten, die als Grundlage einer langfristig schadensfreien Hydrophobierung Beachtung finden müssen.

## 2 Restriktionen für die hydrophobierende Imprägnierung von Fassaden

Bestimmte Randbedingungen können dazu führen, dass eine hydrophobierende Imprägnierung nicht oder nur eingeschränkt funktionstüchtig ist. In diesen Fällen (vergl. auch Abs. 1.3) ist eine genaue Untersuchung der Wirksamkeit durch einen Fachplaner angeraten. Sollte dies nicht möglich sein, ist von der Hydrophobierungsmaßnahme abzusehen.

### 2.1 Feuchteintrag durch Regen über konstruktive Fehlstellen und Bereiche mit konstruktiv erhöhter Feuchtelastung

Die hydrophobierende Imprägnierung einer steinsichtigen Fassade sollte als umfassende Schutzmaßnahme immer zuletzt, nach der konstruktiven Reparatur der Fassade und dem Ausschöpfen möglicher anderer bzw. ergänzender Feuchteschutzmaßnahmen, durchgeführt werden. Hierunter ist zu verstehen, dass zuerst konstruktive Schutz-Maßnahmen, die dem Regenschutz der Fassade dienen können, geprüft und gegebenenfalls ausgeführt werden sollten.

Beispiele hierfür sind

- Dachüberstände
- Abdeckungen von stark regenbelasteten Bauteilen wie
  - Mauerkronen
  - Wasserschlägen
  - Gesimsen
  - Etc.

Da die Poren durch eine Hydrophobierung nicht verschlossen werden, kann dauerhaft anstehendes Wasser, ggf. sogar drückendes Wasser trotz einer Hydrophobierung in die Poren einsickern. Durch die nach der Hydrophobierung gegenüber dem kapillar leitfähigen Material eingeschränkte Rücktrocknung, kann dies zu einer Feuchtekumulation hinter der hydrophoben Zone führen. In der Folge sind Frostschäden möglich.

## 2.2 Anderweitige Durchfeuchtungen

Ein ähnliches Problem kann auch durch rückwärtige Durchfeuchtungen oder erhöhte Feuchtebelastung aus anderen Quellen als „Regen“ entstehen.

Beispiele hierfür sind

- Schadhafte Wasserführungen durch Schäden an Dachrinnen, Fallrohren oder der Dacheindeckung
- Oberflächlich anlaufendes und aufstauendes Wasser, Spritzwasser etc.
- Aufsteigende Feuchte aus dem erdberührten Bereich durch fehlende oder schadhafte Abdichtungen und/oder Drainagen
- Leckagen an den wasser- bzw. abwasserführenden Systemen im Gebäude

## 2.3 Salzanreicherungen im Mauerwerk

Salzanreicherungen in Baustoffen können zu erhöhter Absorption von Luftfeuchtigkeit führen, da Salze je nach Art und Zusammensetzung die Fähigkeit haben, Feuchtigkeit aus der Luft einzulagern, was als Hygrokopizität bezeichnet wird. Da eine Hydrophobierung dem behandelten Baustoff praktisch seine volle Diffusionsfähigkeit beläßt, wird der Prozess der Feuchteabsorption durch die hydrophobierende Imprägnierung nicht verhindert und auch nur eingeschränkt verlangsamt.

Langfristig erfolgt der Salztransport in Verbindung mit flüssigem Wasser in Richtung der Verdunstungszone. Dort kommt es dann zu Salzanreicherungen. Nach einer Hydrophobierungsmaßnahme liegt diese Verdunstungszone unterhalb des hydrophobierten Bereichs; es wird also durch die Eindringtiefe der Hydrophobierung eine Salzanreicherungsebene festgelegt. Wenn bei niedriger Luftfeuchtigkeit die im Salz „gespeicherte“ Feuchte abgegeben wird, kristallisieren die Salze aus. Dieser Kristallisationsvorgang bedingt eine Volumenvergrößerung der Salze im Porenraum und es kommt zu einer mechanischen Beanspruchung des Baustoffs. Bei entsprechenden Luftfeuchtigkeitsschwankungen ist dieser Vorgang immer wiederkehrend und kann zu einer strukturellen Zerstörung des Baustoffs unterhalb des hydrophobierten Oberflächenbereichs führen. Langfristig kann dies zu einer Schwächung dieses Bereichs bis hin zur Schalenbildung führen.

Gesamtsalzgehalte > 1 Masse-% im oberflächennahen Bereich sind in jedem Fall kritisch zu betrachten. Um zu einer aussagekräftigen Beurteilung zu kommen, sind genaue Untersuchungen hinsichtlich der Art der Salze und ihrer Hygroskopizität erforderlich.

## 2.4 Quellfähige Tonminerale

Ein hoher Gehalt an quellfähigen Tonmineralen, der üblicherweise nur bei bestimmten Natursteinen zu finden ist in seltenen Fällen jedoch auch bei niedrig gebrannten Ziegeln, kann ebenfalls zu erhöhter Feuchteabsorption führen und die Wirkung der Hydrophobierung nachhaltig beeinflussen.

Der Nachweis über das Vorhandensein solcher Tonminerale erfolgt über Dilatationsmessungen bei unterschiedlichen Feuchtegehalten.

## 3 Auswahl des Imprägniermittels

In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Wirkstoffe hydrophobierender Imprägnierungen erheblich weiterentwickelt. Stand der Technik sind heute Silane oder Silan/Siloxan-Gemische in unterschiedlichen Produktformen:

- Lösemittelhaltig, flüssig
- Wässrige Emulsionen, flüssig
- Wässrige Emulsionen, cremeförmig

Hinsichtlich der Eindringtiefe, dem wesentlichsten Qualitätskriterium bei der Ausführung einer hydrophobierenden Imprägnierung, zeigen diese drei Gruppen spezifische Eigenheiten.

- Flüssige Hydrophobierungsmittel haben ihre Berechtigung heute, nach Entwicklung der Cremetechnologie, nur noch für stark saugfähige Untergründe und zum „vertiefenden“ Überarbeiten bestehender Hydrophobierungen. Zur Imprägnierung von Baustoffen mit geringer bis mittlerer Saugfähigkeit ist cremeförmigen Produkten gegenüber flüssigen der Vorzug zu geben.
- Die Eindringtiefe flüssiger, wässriger Emulsionen ist im Vergleich zu flüssigen lösemittelhaltigen Produkten in aller Regel deutlich geringer, da die Teilchengröße erheblich höher ist. Wenn ein flüssiges Produkt zum Einsatz kommen soll und keine Restriktionen gegenüber Lösemitteln bestehen, sollte daher ein lösemittelhaltiges Produkt verwendet werden.
- Ein Vorteil cremeförmiger Produkte besteht darin, dass ein nahezu verlustfreies Arbeiten auch über Kopf möglich ist und die Auftragsmenge dabei gut kontrollierbar ist.

Neben diesen grundsätzlichen Produktformen existieren Spezialprodukte für besondere Anforderungen, z.B.:

- Produkte mit verstärktem Abperleffekt (meist durch Zusatz von Fluor-Silanen) werden häufig eingesetzt wenn ein Graffiti-Schutz-Effekt erzielt werden soll.
- Produkte für den Einsatz auf reinen Kalksteinen (auf spezielle Auslobung achten). Während Silane bzw. Siloxane mit quarzhaltigen Baustoffen eine hervorragend stabile Verbindung eingehen, müssen sie für den Einsatz auf Kalkstein modifiziert werden.

- Produkte mit zusätzlicher Oleophobie (Ölabweisung), die vor allem bei Bodenschutz- oder Graffitischutzprodukten Verwendung finden.
- Produkte mit alkoholischen Lösemitteln statt Kohlenwasserstoffen, für den Einsatz an Baustoffen mit Kontakt zu Bitumen oder Polystyrol.

Für die Auswahl einer geeigneten Produktform sind die Eigenschaften des zu hydrophobierenden Untergrundes sowie Restriktionen auf Grund des Umfeldes von entscheidender Bedeutung. Nötig sind Kenntnisse zu folgenden Untergrundeigenschaften:

- Mineralogische Zusammensetzung, insbesondere
  - Anteil silikatischer Bestandteile (überwiegend silikatische Materialien wie Ziegel, Sandstein oder auch Kalksandstein sind in aller Regel unproblematisch)
  - Anteil karbonatischer Bestandteile (karbonatisch gebundene Baustoffe, wie z.B. Kalkstein, können problematisch sein, da Silane bzw. Siloxane hier keine echte chemische Anbindung finden; es sind Spezialprodukte zu wählen, s.o.)
  - Vorhandensein von Tonmineralen (meist nur bei tonigen Natursteinen, kann zu Feuchteanreicherung im Material, trotz Hydrophobie führen; Musterflächen sind unbedingt erforderlich)
- Gefüge  
Zu beachten ist hier, dass Inhomogenität das gleichmäßige Einbringen des Materials behindern kann und in grobporen Bereichen kann Feuchtigkeit ggf. partiell in tiefere Zonen transportiert werden. Betroffen sind vor allem
  - Materialien mit hohem Anteil an Mikroporen, die das Eindringen der Hydrophobierung erschweren und so zu unzureichenden Ergebnissen führen können
  - stark geschichtete Materialien, wie einige Natursteine oder manche historische Ziegel
  - Materialien mit von Natur aus stark inhomogen ausgeprägtem Porengefüge, wie magmatischen Tuffen oder Sinterkalken
  - künstliche Materialien mit schlecht verdichteten Bereichen, Lunkern oder sonstigen Fehlstellen
- Saugvermögen  
Das Saugvermögen des zu hydrophobierenden Materials muss ausreichend sein, um eine gute Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels zu ermöglichen (von sich aus nicht oder nur sehr gering saugfähige Materialien benötigen meist keine Hydrophobierung).

## 4 Monitoring und Wartung

Bei den aus den heutigen Wirkstoffen entstehenden Polysiloxanharz-Netzwerken handelt es sich um extrem beständige Schutzstoffe, die außer durch die „normale“ Baustoffverwitterung praktisch nicht zerstört werden können. Aus zwei Gründen ist eine Kontrolle der Wirksamkeit einer Behandlung durch Wasseraufnahmemessungen und ggf. eine auffrischende Behandlung dennoch angeraten.

- Das Entstehen von Fugenflankenabrisse infolge von Temperaturschwankungen und dem zugehörigen Dehnungsverhalten der Fassadenbaustoffe ist langfristig kaum zu unterbinden. Da diese Risse „Fehlstellen“ in der Hydrophobierung sein können, ist ihre Entwicklung zu beobachten und ggf. eine Fugeninstandsetzung durchzuführen.
- Die ausreagierte Hydrophobierung wird an der Fassade nicht zerstört, wird jedoch im oberflächennahen Bereich nach einer gewissen Zeit durch hydrophile Feinstaubpartikel überlagert. Das ist der Grund, warum nach einiger Zeit der Abperleffekt der frischen Hydrophobie verschwindet und somit kein Qualitätskriterium darstellt. Wenn sich über einen gewissen Zeitraum, meist mehrere Jahre, Feinstaubpartikel in den Oberflächenporen abgelagert haben, kann es bei Beregnung zu hohen Feuchtegehalten dieser dünnen Oberflächenzone kommen, da die hier aufgenommene Feuchtigkeit nicht an tiefere Bereiche abgegeben werden kann. Bei relativ geschlossenen Oberflächen, wie sie beispielsweise bei Farbsystemen zu finden sind, kann der Abperleffekt durch Reinigen der Oberfläche reaktiviert werden. Bei porösen Fassadenbaustoffen, bei denen Schmutzpartikel tiefer in die Oberfläche eindringen können, ist dies jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Damit es hier langfristig nicht zu Problemen, wie einer Besiedelung durch Mikrobiologie kommt, empfiehlt sich eine „Auffrischung“ der Oberflächenhydrophobie je nach Exposition im Abstand von ca. 7 bis 10 Jahren.

Im Normalfall sollten Kontrollen im Abstand von ca. 5 Jahren ausreichend sein. Bei kritischen Gesteinen oder starker Bewitterung können auch kürzere Abstände ratsam sein. In diesem Sinne sind Kontroll- und Wartungsverträge für die Zeit nach einer Hydrophobierungsmaßnahme immer zu empfehlen.

## 5 Zusammenfassung

Für die langfristige Schadensfreiheit einer hydrophobierenden Imprägnierung sind neben der Beachtung der kritischen Randbedingungen vor allem die Sorgfalt bei der Auswahl des Hydrophobierungsmittels und die Langzeitkontrolle entscheidend. Letztere dient im Wesentlichen dazu über die Zeit zwangsläufig auftretende konstruktive Schäden frühzeitig zu erkennen und zu reparieren, um Feuchteanreicherungen hinter dem hydrophoben Oberflächenbereich zu vermeiden.

Eine hydrophobierende Imprägnierung darf niemals dazu "missbraucht" werden, den konstruktiven Feuchteschutz zu ersetzen.

## Literatur

- [1] WTA Merkblatt 3-17-2009/D, Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen; Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2009.
- [2] A. Boué: Ist Hydrophobierung heute verantwortbar?, 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Technische Akademie Esslingen, 17.-19. Dez. 1996

- [3] J.Engel: Hydrophobierende Imprägnierung von Fassaden, Praxis-Handbuch Bautenschutz, 161-165, Köln, Rudolf Müller Verlag, 2012

## Fördermöglichkeiten bei der Denkmalsanierung

4. Innendämmkongress, Dresden 19.-20. Mai 2017



### Grundsätze (staatliche Förderung)

- Unmittelbarer Bezug zur Verpflichtung der Erhaltung des Denkmals, z. B. in § 8 SächsDSG
- Anknüpfung an den denkmalbezogenen (Mehr)-Aufwand
  - Auswirkung auf den Fördersatz
- Beihilferecht nach Allgemeiner GruppenfreistellungsVO

### Programme des Bundes

#### I Städtebaulicher Denkmalschutz (Bund/Länder-Programm)

- Sicherung und Erhaltung von historisch wertvollen Altstadtbereichen, die in Struktur und Funktion bedroht sind. Schwerpunkt mittelalterliche Stadtkerne sowie sonstige Siedlungsbereiche mit denkmalwerter Bausubstanz und besonderer stadtbaugeschichtlicher Bedeutung. 58 Programmstädte mit 63 Gebieten. Seit 1991 in Sachsen Mittel in Höhe von 1,22 Mrd. Euro bewilligt.
- Kommunale Antragsteller in schwieriger Haushaltslage
- Verwaltung in Sachsen durch die Sächsische Aufbaubank

### Programme des Bundes

#### I Denkmalpflegeprogramm der Bundesbeauftragten für Kultur und Medien

- Ko-Finanzierung der Maßnahmen durch die Länder

#### I Mauerfonds / PMO-Vermögen

- keine neuen Tranchen in Aussicht

#### I Denkmalschutz-Sonderprogramm der BKM

- Ko-Finanzierung der Maßnahmen durch die Länder

#### I Orgel-Sonderprogramm der BKM (National bedeutsame Orgeln)

- ...

### **Landesprogramm Denkmalpflege des Freistaates Sachsen**

- Programmausstattung: 5,0 Mio. €/a
- Dezentrale Verwaltung über die Landratsämter
- Antragstellung bis zum 30. September des Vorjahres

5 | 26. April 2017 | SMI - Referat 51

### **Sonderprogramm Denkmalpflege des Freistaates Sachsen**

- Programmausstattung: 5,0 Mio. €/a
- Zentrale Verwaltung durch Landesamt für Denkmalpflege
- Kofinanzierung BKM-Sonderprogramme
- Förderung Umgebindehäuser: ca. 500,0 T€
- Sonstige Vorhaben von herausgehobener Bedeutung

6 | 26. April 2017 | SMI - Referat 51

### **Stiftungen u. a.**

STAATSMINISTERIUM  
DES INNERN



- | Sparkassenstiftungen
- | Deutsche Stiftung Denkmalschutz
- | Wüstenrot-Stiftung
- | Rudolph-August Oetker Stiftung
- | Hermann Reemtsma Stiftung
- | Nordrhein-Westfalen-Stiftung Naturschutz, Heimat- und Kulturpflege
- | Denkmalstiftung Baden-Württemberg
- | Bayerische Landesstiftung
- | Stiftung Industriedenkmal und Geschichtskultur
- | Stiftung KiBa
- | Denkmalfonds Schleswig-Holstein e. V.

7 | 26. April 2017 | SMI - Referat 51

### **Sonstiges**

STAATSMINISTERIUM  
DES INNERN



- | Kulturräumförderung
- | Europäisches Jahr des Kulturellen Erbes 2018
- | Bauhausjubiläum 2019

8 | 26. April 2017 | SMI - Referat 51

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

# Renditeoptimierung durch Energieberatung

Stefan Preiß, Energieberatung Preiß

Dozent für : Gebäudeenergieberatung, Energieeffizienz-Experten,  
Energieberater für Baudenkmale [s.preiss@energieberatung-preiss.de](mailto:s.preiss@energieberatung-preiss.de)

---

## 1 Einleitung

Innendämmungen sind aufgrund der umfangreichen Eingriffe in die Bausubstanz Maßnahmen, welche in der Regel nur in nicht bewohnten Gebäuden ausgeführt werden. In diesem Zuge ist es Standard, dass die Gebäude nicht nur eine Innendämmung erhalten, sondern komplett saniert werden. Da Sanierungen mit Innendämmungen aber nicht nur bauphysikalisch, sondern auch finanziell anspruchsvoll sind, ist eine Optimierung der Finanzierung genauso wichtig wie die bauphysikalische Auslegung. Sanierungen unterliegen dem Gebot der Wirtschaftlichkeit. Liegt diese nicht vor, dann kommt es auch zu keiner Sanierung.

Gebäude, an welchen Innendämmungen ausgeführt werden, haben Fassaden, welche nicht außen gedämmt werden können oder dürfen und stehen unter Denkmalschutz bzw. sind als besonders erhaltenswerte Bausubstanz einzustufen. Neben den steuerlichen Abschreibungsmöglichkeiten gibt es außer vereinzelten kommunalen Programmen insbesondere die Programme der KfW, welche mit günstigen Krediten und Zuschüssen helfen, eine wirtschaftliche Sanierung möglich zu machen.

Unser Büro bearbeitet jährlich weit über 100 größere Bauvorhaben mit durchschnittlich 13 000 Wohn- und Gewerbeeinheiten energetisch und berät über die Möglichkeiten eines sicheren, richtigen und optimierten Einsatz dieser Mittel. In den nunmehr über 20 Jahren kam es in unserem Büro noch nicht zu Rückabwicklungen oder Kürzungen von KfW-Darlehen oder Zuschüssen. Alleine im vergangenen Jahr wurden ca. 50 Prüfungen der KfW an von uns begleiteten Bauvorhaben unbeanstandet durchgeführt.

Bevor ich auf die 6 unterschiedlichen Möglichkeiten der Optimierung eingehe, sollte in aller Kürze der Kontext betrachtet werden, warum es die Förderung durch die KfW gibt und in welchem politischen Umfeld sie einzuordnen ist. In Schlagwörtern:

- Globaler Temperaturanstieg sollte unbedingt auf < 2°C begrenzt werden
- Die Weltbevölkerung wächst schnell und mit ihr der Energiehunger
- Die Vorkommen der fossilen Energieträger sind begrenzt und in politisch fragilen Ländern

-  
Die Regierungen der Bundesrepublik Deutschland haben deshalb in verschiedensten internationalen Abkommen zugesagt, einen wesentlichen Beitrag zu Reduktion des CO2- Ausstoßes zu leisten. Jeder Neubau – und sei er noch so effizient – verbraucht Energie. Eine Reduktion des Verbrauchs muss deshalb an der energetischen Verbesserung des Gebäudebestands ansetzen. Unter der Überschrift „Fordern und Fördern“ wird dies auch umgesetzt.

Die politischen und gesetzgeberischen Maßnahmen auf der Seite „Fordern“ sind hierbei insbesondere:

- Die EU-Gebäuderichtlinie[1] (2002/91/EG +2010/31/EU) verlangt 2020 das nahezu klimaneutrale Gebäude
- Die EnEV [2] 2014 mit Verschärfung 2016 verlangt hohe energetische Qualität
- Das GEG (Gebäudeenergiegesetz) wird in dieser Legislaturperiode nicht mehr verabschiedet
- Die EnEV 2020 soll zur Einhaltung der europäischen Gebäuderichtlinie die Anforderungen nochmals deutlich erhöhen
- Der Klimaschutzplan 2050 [3]
- Der Atomausstieg, die Schließung unrentabler Kohlekraftwerke und der Bau neuer Stromtrassen führen zu deutlich erhöhten Stromkosten und bergen die Gefahr von Versorgungsausfällen

Bemerkenswert ist auch die Entwicklung des Energieausweises. Einhergehend mit der Veröffentlichungspflicht von energetischen Kennzahlen in Immobilienanzeigen hat sich auch die Art der Ausstellung der Ausweise geändert. Konnten die Energieberater bis dahin die Ausweise selbst erstellen, müssen diese jetzt beim staatlichen DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) registriert werden. Dies führt dazu, dass der Baubestand bis zur Einführung der EnEV (oder des GEG) 2020 weitgehend erfasst ist und energetische Durchschnittsdaten für die unterschiedlichen Gebäudearten ermittelt werden können. Sieht man das im Kontext der Diskussion über die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer, welche als „aufkommensneutrale“ Steuer mit Bonus-Malus-Regelung eingeführt werden könnte, so wäre der Energieausweis Besteuerungsgrundlage. Auch deshalb ist es wichtig, vorausschauend zu agieren, die Berechnungen zu optimieren und damit die Steuerlast zu reduzieren oder sogar einen Bonus zu erhalten.

Aufgrund der Vielfalt der Programme der KfW und der daraus resultierenden Möglichkeiten beschäftige ich mich hier schwerpunktmäßig mit dem Bereich Wohnbau. Analog hierzu gibt es jedoch auch Programme für Nichtwohnbau.

## **2 Möglichkeiten der Renditeoptimierung durch Energieberatung**

### **2.1 Optimierung der Berechnung**

These:

Durch optimierte Berechnung erreicht man mindestens eine höhere Effizienzhausstufe – mit erhöhter Sicherheit der Bauqualität und ohne bauliche Mehrkosten – oder im Umkehrschluss – niedrigere Baukosten bei gleicher Effizienzhausstufe.

#### **2.1.1 Wahl der Berechnungsnorm und der Software**

Bevor der Blick auf die eigentliche Berechnung gerichtet wird, sollte man betrachten, mit welcher Berechnungsart und mit welchem Programm gerechnet wird, denn hier ergeben sich durchaus relevante Unterschiede im Ergebnis, was die Wirtschaftlichkeit deutlich beeinflussen kann. Grundsätzlich können Berechnungen im Wohnungsbereich wahlweise auf Basis der DIN V 4108-6 [4] und der DIN V 4701-

10 [5] - was in über 90% der Berechnungen der Fall ist – oder auf Basis der DIN V 18599 [6] erfolgen. Hier können im Einzelfall mit der Auswahl des Berechnungsverfahrens durchaus einige Prozent Unterschied im Ergebnis erfolgen, weshalb immer überprüft werden sollte, welches Verfahren man anwendet. Wendet man die DIN V 18599 als – zukünftig verpflichtende – Berechnungsmethode an, dann ist die Auswahl der Berechnungs-Software wichtig. Aufgrund dessen, dass bei gleicher Eingabe enorme Unterschiede in den Ergebnissen bei unterschiedlichen Programmen resultierten, sah sich die KfW zeitweise gezwungen, keine Berechnungen nach DIN V 18599 zuzulassen. Inzwischen hat das BMUB eine Liste zugelassener Programme für die Beantragung in den Programmen 151/430 (Energieeffizient Sanieren) und 153 (Energieeffizient Bauen) erstellt [7] (<http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen-veroeffentlichungen-veroeffentlichungen-din-18599.html>), doch noch immer sind hier in den Ergebnissen Unterschiede festzustellen, weshalb wir auch 3 unterschiedliche Berechnungsprogramme nutzen. Es empfiehlt sich deshalb, dies bei der Auswahl einer neuen Software zu berücksichtigen.

## 2.1.2 Verwendung von Produktkenndaten statt DIN-Normwerten

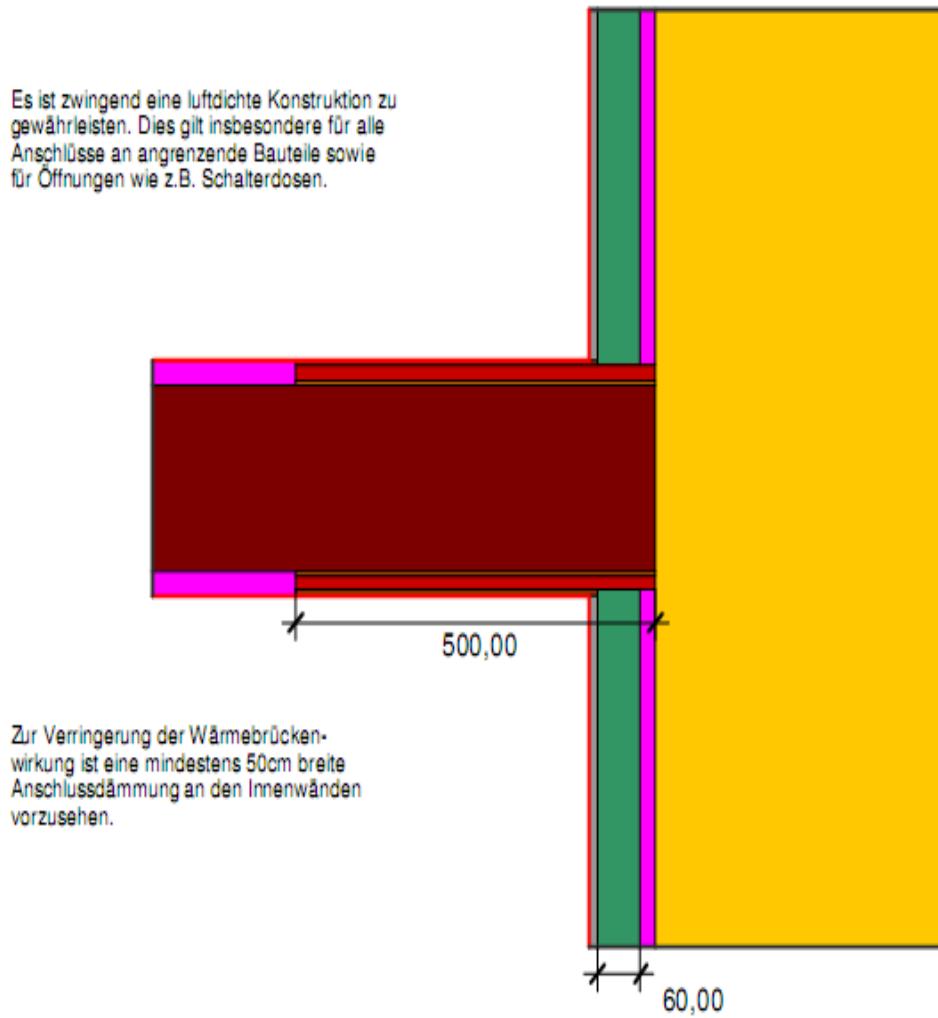
In allen Energieberatungsprogrammen sind die Produktkenndaten der DIN EN 12524 [8] hinterlegt, meist sind auch komplett Aufbauten für die Bauteile der energetischen Hülle und Dämmsysteme hinterlegt. Das macht die Verwendung in der Berechnung einfach, schnell und sicher. Deshalb verwenden auch die meisten Energieberater diese Daten. Da es nicht zulässig ist, zu gute Annahmen zu treffen, die DIN aus dem Jahre 2000 nicht die aktuellsten Materialien beinhaltet und auch nicht die Art des Einbaus kennt, sind hier große Sicherheiten beinhaltet. Zulässig ist es aber auch, die tatsächlichen Produktkennwerte zu verwenden. Dies ist aufwändig in der Recherche und Eingabe und erfordert auch genaue Vorgaben, erbringt aber deutlich bessere Ergebnisse.

Beispiel: Bei einem WDVS bleibt, da die Art der Befestigung nicht klar ist, der Klebemörtel unberücksichtigt, die Dämmplatten weisen noch nicht die Werte der modernen Hochleistungsdämmungen auf und Armierungsmörtel und Putz haben sehr schlechte Dämmeigenschaften. Die Berücksichtigung eines bauphysikalisch richtig ausgelegten Aufbaus mit Produktkennwerten erbringt eine Verbesserung von 5-7%.

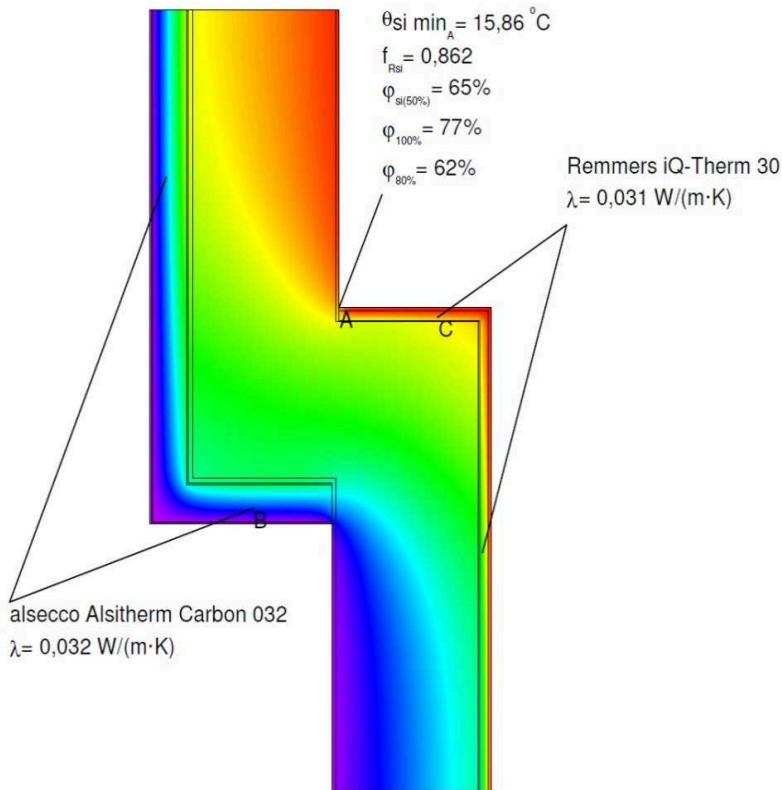
Noch deutlichere Unterschiede gibt es bei der Anlagentechnik. In allen Programmen ist die Anlagentechnik bereits hinterlegt. Ein Klick auf die Art der Heizungsanlage und schon ist die Berechnung fertig! Hier lohnt es sich ganz besonders, genauer zu arbeiten. So weisen beispielsweise die besten „verbesserten“ Brennwertanlagen einen Wirkungsgrad von 104% auf, während moderne Anlagen durchgängig Werte über 107% aufweisen, BHKWs sind mit einem Primärenergiefaktor von 0,7 angesetzt liegen aber je nach Größe und Hersteller teilweise unter 0,3. Pelletsanlagen weisen dramatisch schlechte Wirkungsgrade von 0,8 auf. Während 0,93-0,95 üblich sind. Auch lohnt es, die elektrische Leistungsaufnahme der Geräte einzupflegen und die stromfressenden Pumpen der hinterlegten Berechnung gegen Hocheffizienzpumpen zu tauschen. Weiteres Potential hat die Speicherung und die Verteilung. Eine Verbesserung der Ergebnisse von bis zu 30% ist eher die Regel als die Ausnahme.

## 2.2 Optimierung des Wärmebrückenzuschlags

Rechtlich ist es so, dass der Einfluss konstruktiver Wärmebrücken nach Maßgabe des §7 Absatz 2 der EnEV so gering wie möglich zu halten ist. Deshalb sollte auch eine entsprechende Planung erfolgen, um die Ausführungsqualität sicher zu stellen. Bei Innendämmungen ist gemäß WTA-Merkblatt 6-4 [9] die Schadensfreiheit in Anschlussbereichen (einbindende Bauteile, Fensterleibungen, etc.) nachzuweisen, was mittels Wärmebrückennachweisen erfolgt („Abbildung 1“ und „Abbildung 2“). Gemäß EnEV § 8.1 Anlage 3 kann der Wärmebrückenzuschlag bei ungedämmten und außengedämmten Gebäuden mit  $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , bei überwiegend innengedämmten Gebäuden mit einbindender Geschossdecke mit  $\Delta U_{WB} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  pauschal angesetzt werden.



**Abbildung 1:** Wärmebrückendetail einer einbindenden Wand bei Innendämmung



**Abbildung 2:** Übergang Außendämmung zu Innendämmung mit Produktangaben

Welchen positiven Einfluss ein komplett berechneter Wärmebrücken-Einelnachweis gegenüber dem pauschalen Ansatz hat, zeigen die Werte aus der Berechnung eines innengedämmten Gebäudes („Abbildung 3“). Im Durchschnitt ist hier bei der Gebäudehülle eine Verbesserung von 0,0725 W/m<sup>2</sup>K erforderlich, um die nächst höhere Effizienzhausstufe zu erreichen. Dieser Wert für das Gebäude ist vergleichsweise sehr hoch. Die Spanne liegt zwischen 0,58 und 0,75 W/m<sup>2</sup>K. Der differenzierte Nachweis ergab hier einen Wärmebrückenzuschlag von 0,026 W/m<sup>2</sup>K. Verglichen mit dem Pauschalwert von 0,15 W/m<sup>2</sup>K ist dies eine rechnerische Verbesserung von 0,124 W/m<sup>2</sup>K und somit um fast 2 Effizienzhausstufen (vgl. „Tabelle 2“).

#### Transmissionswärmeverlust

- Der errechnete Höchstwert des auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche des Gebäudes bezogenen spezifischen Transmissionswärmeverlustes  $H'_T$  mit den Anforderungen für das **Referenzgebäude (100 %-Wert)** nach EnEV Anlage 1 Tabelle 1 beträgt 0,482 W/(m<sup>2</sup>K).
- Der berechnete auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche des Gebäudes bezogene spezifische Transmissionswärmeverlust  $H'_T$  nach EnEV für das **Sanierungsobjekt** beträgt 0,502 W/(m<sup>2</sup>K).

#### Wärmebrücken

Berücksichtigung von Wärmebrücken gemäß DIN V 4108-6, Anhang D3 Zeile 15 oder EnEV Anlage 3 Nummer 8.1:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> pauschal mit 0,15 W/(m <sup>2</sup> K)   | <input type="checkbox"/> pauschal mit 0,10 W/(m <sup>2</sup> K) | <input type="checkbox"/> pauschal mit 0,05 W/(m <sup>2</sup> K)<br>mit erbrachtem Gleichwertigkeitsnachweis |
| <input checked="" type="checkbox"/> über differenzierten Nachweis mit einem auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Wärmeverlust von |   | 0,026 W/(m <sup>2</sup> K)  |

Referenzgebäude (EnEV)	0,482 W/(m²·K)		
	1. Zulässiger Höchstwert <sup>1</sup> <sub>2</sub>	2. Zulässiger Höchstwert <sup>1</sup> <sub>3</sub>	Berechneter Wert
KfW Effizienzhaus 115	0,627 W/(m²·K)	0,630 W/(m²·K)	
KfW Effizienzhaus 100	0,554 W/(m²·K)	0,630 W/(m²·K)	
KfW Effizienzhaus 85	0,482 W/(m²·K)	0,630 W/(m²·K)	
KfW Effizienzhaus 70	0,410 W/(m²·K)	0,630 W/(m²·K)	
KfW Effizienzhaus 55	0,337 W/(m²·K)	0,630 W/(m²·K)	
			<=> 0,502 W/(m²·K)

**Abbildung 3:** Einfluss Wärmebrücken-Einelnachweis auf das Effizienzhaus

### 2.3 Vorteile bei der Einstufung als EH Denkmal oder bei erhaltenswerter Bausubstanz

Für Gebäude, welche unter Denkmalschutz stehen oder von der Kommune als besonders erhaltenswerte Bausubstanz eingestuft sind, gelten bei der KfW verbesserte Rahmenbedingungen gegenüber Sanierungen nicht geschützter Gebäude. Werden Innendämmungen verwendet, dann sind zumindest Fassaden vorhanden, die aufgrund ihrer Materialität, Gestalt oder Bauweise schützenswert und somit als besonders erhaltenswerte Bausubstanz gemäß §24 EnEV einzustufen sind. Es gelten folgende Kriterien für die Einstufung [10]:

- Das Gebäude befindet sich in einem Gebiet mit einer Erhaltungssatzung gem. § 172 Abs.1 Nr.1 BauGB
- Das Gebäude befindet sich in einem Sanierungsgebiet gem. § 142 BauGB, zu dessen besonderen Sanierungszielen die Erhaltung der baukulturell wertvollen Bausubstanz gehört (§ 136 Abs. 4 Nr. 4 BauGB)
- Das Gebäude ist durch die Kommune durch Satzung, öffentliche Listung bzw. im Rahmen eines beschlossenen integrierten Stadtentwicklungskonzepts oder Quartierskonzepts ausdrücklich als sonstige besonders erhaltenswerte Bausubstanz ausgewiesen
- Das Gebäude ist auf sonstige Weise durch örtliche Bauvorschriften (z. B. Gestaltungssatzung, Altstadtsatzung, Satzung zum Erhalt des Stadtbildes oder entsprechende Festsetzungen örtlicher Bauvorschriften im Bebauungsplan) auf Basis der Landesbauordnung geschützt
- Das Gebäude ist Teil einer Gesamtanlage (Denkmalensemble, Denkmalbereich, Denkmalschutzgebiet oder Denkmalzone nach Landesdenkmalgesetz)
- Das Gebäude befindet sich in einem Gebiet der Liste "Stadtkerne und Stadtbereiche mit besonderer Denkmalbedeutung" der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger
- Das Gebäude ist wegen seines Baualters oder seiner besonderen (städtischen) Lage ortsbild- oder landschaftsprägend
- Das Gebäude ist wegen seiner spezifischen Materialität, Gestalt sowie Bauweise und dem architektonischen Erscheinungsbild als Teil regionaler Bautradition ortsbild- oder landschaftsprägend

Vielfach unbekannt ist die Sonderregelung der KfW, welche besagt, dass im Gegensatz zur Sanierung nicht geschützter Gebäude, der Ausbau von bisher nicht

wohnwirtschaftlich genutzter Dachgeschosse, sowie Anbauten zur Erweiterung im Sanierungsprogramm 151/430 gefördert werden.

Dies bringt zwei Verbesserungen. Zum Einen gelten für neue Bauteile die Vorschriften der EnEV ohne Ausnahmeregelung. D.h. mit den Aus- und Anbauten müssen sowieso hochwertige Bauteile ausgelegt werden, was die energetische Gesamtqualität des Gebäudes deutlich verbessert. Zum Anderen bringt die Einstufung in das Programm „Energieeffizient Sanieren“ fördertechnische Vorteile. Beispiel: Wir haben ein Gebäude mit 8 Wohneinheiten im Bestand und 2 neuen Wohneinheiten im Dachgeschoss. Bei getrennter Berechnung erreicht man im neu ausgebauten Dachgeschoss ein Effizienzhaus 55, im Bestand ein EH 100. Bei Gesamtbetrachtung ein EH 70. Bei nicht geschützten Gebäuden sind die Bestandswohnungen im Programm 151/430 anzusetzen, die DG Wohnungen im Neubauprogramm 153, bei geschützten Gebäuden alle Wohnungen im Programm 151/430. Die maximale Darlehenssumme liegt in beiden Fällen bei  $10 \times 100.000\text{€} = 1.000.000\text{€}$ . Der Tilgungszuschuss beträgt im nicht geschützten Gebäude 130.000€, im geschützten Gebäude jedoch 225.000€.

Es ist deshalb auf jeden Fall empfehlenswert zu überprüfen, inwieweit ein nicht unter Denkmalschutz stehendes Gebäude eine besonders erhaltenswerte Bausubstanz darstellt.

## 2.4 Optimierung der Finanzierung

Es gilt der Grundsatz:“ Wer finanziert, muss auch die Kosten nachweisen“.

### 2.4.1 Sanierung bestehender Gebäude

Die übliche Art des Nachweises erfolgt über die Liste der förderfähigen Maßnahmen[11] der KfW, nach welcher vorhandene Rechnungen in förderfähige und nicht förderfähige Maßnahmen aufgeteilt werden. Hierbei können auch alle Kosten, die zur Wiederherstellung von Oberflächen erforderlich sind angesetzt werden. Beispielsweise können bei einem Fensteraustausch auch die Kosten der Fensterbänke, das Einputzen der Fenster und die daraus resultierenden Malerarbeiten angesetzt werden. Dieses Verfahren wird immer dann angewendet, wenn demjenigen, der KfW-Mittel in Anspruch nimmt, auch Rechnungen vorliegen.

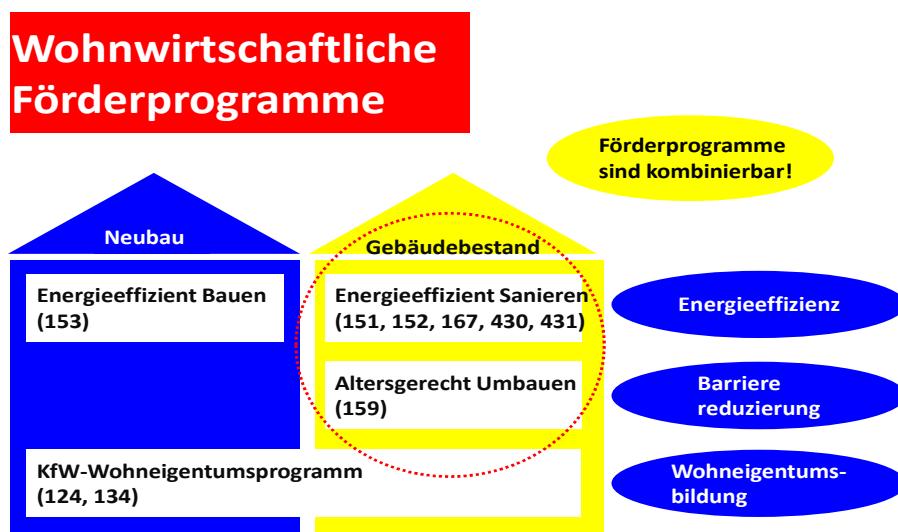
### 2.4.2 Ersterwerb sanierten Wohneigentums

Innendämmungen werden häufig im Denkmal (besonders erhaltenswerter Bausubstanz) eingesetzt. Sehr häufig werden Wohnungen dort aufgrund der Abschreibungsmöglichkeiten nach § 10i EStG im Aufteilergeschäft an Enderwerber veräußert, welche dann die komplett sanierte Wohnung übernehmen. Dies definiert die KfW als „Ersterwerb eines sanierten Denkmals“. Hier finanziert der Enderwerber den Kauf der Wohnung unter Nutzung der KfW-Programme 151,152 oder 430. Die Wohnungen eines Gebäudes müssen vor Baubeginn verkauft sein, damit die Denkmal AfA erhalten bleibt. Nach Fertigstellung liegen dem finanziierenden Käufer jedoch auch keine Rechnungen vor, womit der übliche Nachweis über die Liste der förderfähigen Maßnahmen nicht möglich ist. Deshalb ist hier eine abweichende Vorgehensweise erforderlich.

Die förderfähigen Kosten werden vor Baubeginn anhand der Kostenschätzung des Bauträgers ermittelt und in die Verkaufspreisliste übernommen, damit den Ersterwerbern die Höhe für ihre Finanzierung bekannt ist. Im notariellen Kaufvertrag werden die förderfähigen Kosten explizit in dieser Höhe vertraglich vereinbart. Der Ersterwerber bezahlt – in der Regel über die MaBV [12] – die förderfähigen Kosten an den Bauträger. Die Kalkulation der hierbei anfallenden Kosten und das wirtschaftliche Risiko liegt hier beim Bauträger.

### **2.4.3 Bauträgerfinanzierung**

Weithin unbekannt ist, dass auch eine Bauträgerfinanzierung mit KfW-Darlehen möglich ist und zwar in allen Varianten. Dies gilt sowohl dann, wenn der Bauträger das Objekt im Bestand behält, Wohnungen einzeln oder das Objekt an einen Globalerwerber veräußert. KfW Finanzierungen sind übertragbar. D.h. die finanziierende Bank des Bauträgers reicht die KfW- Darlehen an die finanziierende Bank eines Erwerbers aus und das Darlehen wird auf den Enderwerber umgeschrieben. Dieses Verfahren ermöglicht dem Bauträger eine sehr günstige Bauträgerfinanzierung. Wichtig ist dieses Verfahren auch bei Änderungen des energetischen Standards der EnEV, um die KfW-Darlehen für noch nicht verkaufte Einheiten zu sichern. Durch die Verschärfungen der letzten EnEV im Neubau fällt das Effizienzhaus 70 bei der KfW weg. Baut ein Bauträger nach diesem Standard, hat aber die Wohnungen teilweise noch nicht verkauft, so kann er für die nicht verkauften Wohneinheiten vor Änderung der Programmbedingungen noch beantragen und bei einem Verkauf an die Enderwerber ausreichen.



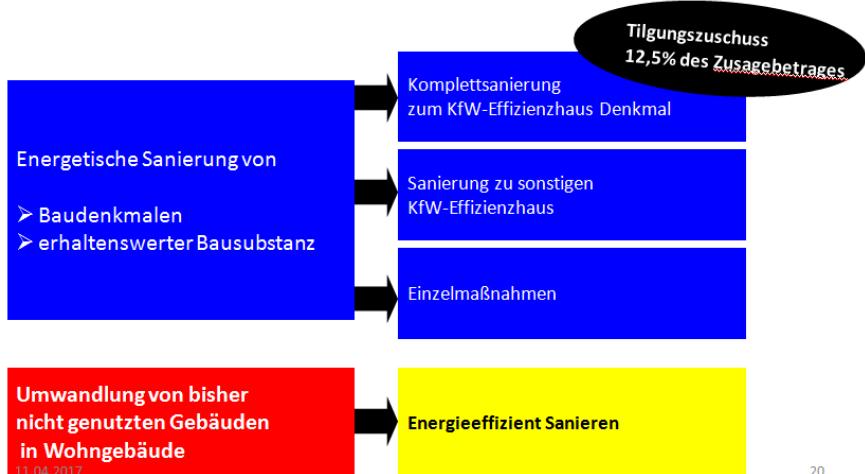
**Abbildung 4:** Die wohnwirtschaftlichen Programme der KfW [13]

Besonders wichtig hierbei ist das Programm „Energieeffizient Sanieren“ 151- Kredit 152 – Einzelmaßnahmen Kredit und 430 – Zuschuss

#### Gefördert werden:

- Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser
  - Eigentumswohnungen
  - Wohnheime – z.B. Studentenwohnheime, Alten.- und Pflegeheime

Energieeffizient Sanieren  
„KfW-Effizienzhaus Denkmal“



Dozent für Gebäudeenergieberatung Stefan Preiß

Zur Erstellung der Bestätigungen zum Antrag und der Bestätigungen nach Durchführung muss der Sachverständige die Qualifikation „Energieberater für Baudenkmale“ aufweisen.

**Tabelle 1:** Konditionen Programme 151/152

Tabelle 1: Konditionen Programme 15/152	
Höchstbetrag	50.000.- pro WE/ Einzelmaßnahmen und Paketen 100.000.- pro WE bei Effizienzhäusern
Zinssatz	0,75% effektiv
Laufzeit	Bis zu 30 Jahre oder 10 Jahre endfällig
Zinsbindung	10 Jahre
Tilgungsfreie Anlaufjahre	1 bis zu 5 Jahre
Sicherheiten	Banküblich
Bereitstellungsprovision	12 Monate frei, danach 0,25% p. M.
Sondertilgung	Kostenfrei ab 1.000€
Tilgungszuschuss	12,5 % bis 27,5 % je nach KfW-Effizienzhaus
Kombination	Mit anderen öffentlichen Fördermitteln grundsätzlich möglich

**Tabelle 2:** Effizienzhaus-Standards- Anforderungen und Tilgungszuschüsse

Tabelle 2: Erreichbares Standard-Anforderungen und Tilgungszuschuss				
EH-Standard	Jahresprimär-energiebedarf	Transmissionswärmeverlust	Tilgungszuschuss	Förderhöchstbetrag pro WE
EH 55	55%	70%	27,5%	27.500,-
EH 70	70%	85%	22,5%	22.500,-
EH 85	85%	100%	17,5%	17.500,-
EH 100	100%	115%	15%	15.000,-
EH 115	115%	130%	12,5%	12.500,-
EH Denkmal	160%	175%	12,5%	12.500,-
Heizungspaket Lüftungspaket			12,5%	6.250,-
Einzelmaßnahmen			7,5%	3.750,-

Im reinen Zuschuss-Programm 430 liegen die Zuschüsse um jeweils 2,5% höher als im Kreditprogramm 151. Die einleitende These war: „Durch optimierte Berechnung erreicht man mindestens eine höhere Effizienzhausstufe – mit erhöhter Sicherheit der Bauqualität und ohne bauliche Mehrkosten“. Das ist machbar! Bei einem Sprung von einem EH100 auf ein EH 70 ergibt sich ein 7,5% höherer Zuschuss pro WE von bis zu 7.500€. Da die meisten Baudenkmale im städtischen Bereich doch über eine höhere Anzahl von Wohneinheiten verfügen, eröffnet uns dies die Möglichkeit, auch aufwändige Sanierungen mit Innendämmungen wirtschaftlich darstellen zu können.

## 2.5 Ergänzung mit Pr.159/ 455 –Altersgerecht Umbauen

Die Förderbereiche sind:

1. Wege zu Gebäuden und Wohnumfeldmaßnahmen („Abbildung 6“)
2. Eingangsbereich und Wohnungszugang („Abbildung 7“)
3. Vertikale Erschließung/Überwindung von Niveauunterschieden („Abbildung 8“)
4. Anpassung der Raumgeometrie („Abbildungen 9+10“)
5. Maßnahmen an Sanitärräumen („Abbildung 11+12“)
6. Sicherheit, Orientierung und Kommunikation („Abbildung 13“)
7. Gemeinschaftsräume, Mehrgenerationenwohnen

Da umfangreiche Sanierungen nicht nur energetischer Natur sind, sondern auch andere Bereiche betreffen, ist es häufig sinnvoll, das Programm „Altersgerecht Umbauen“ zusätzlich zu nutzen, denn in der Regel werden viele Bausteine sowieso baulich umgesetzt und Ergänzen die Finanzierung („Tabelle 3+4“).

In der Folge ein paar erläuterte Bilder eines Denkmals in Ludwigshafen (Neue Hofgärten), da eine komplette Erläuterung den Rahmen einer Übersicht sprengen würde.

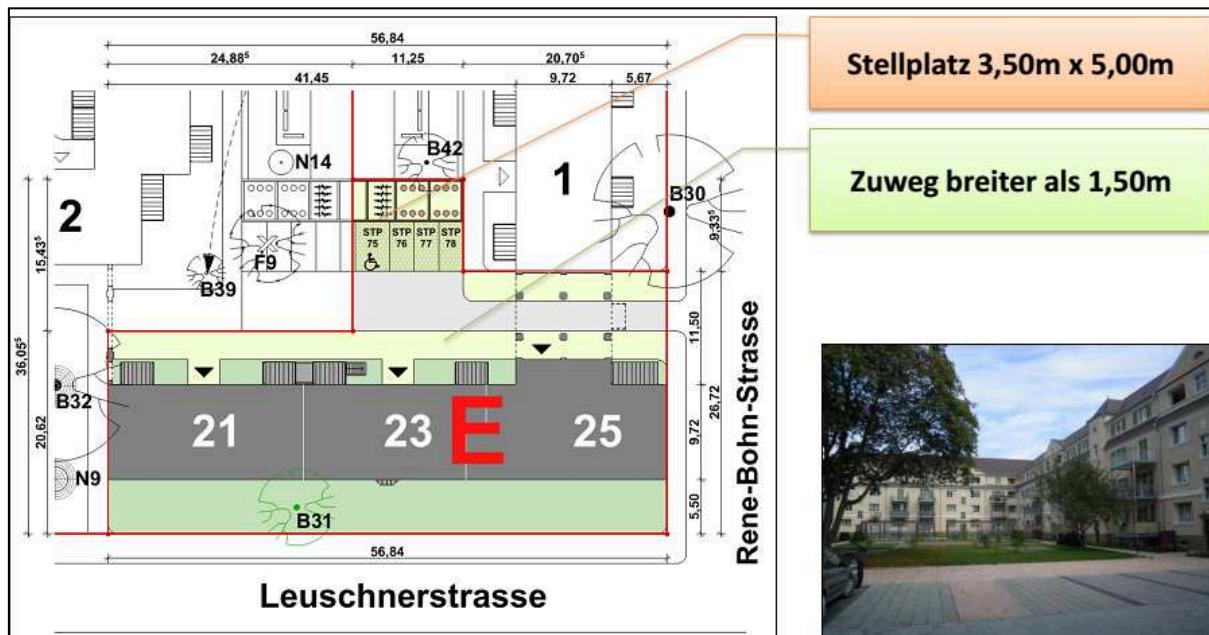


Abbildung 6: Wege zum Gebäude – Förderbereich 1

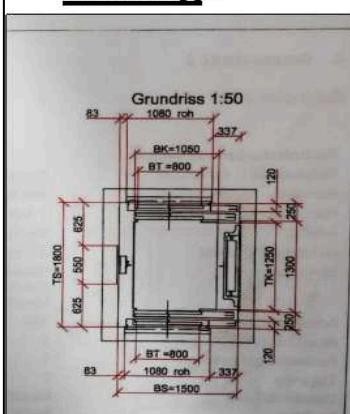


- Haustüre im Lichten > 90 cm
  - schwellenfreier Zugang
  - Zuweg ca. 190cm breit  $\geq$  150cm
  - Klingel/Sprechanlage (FB6)



**Abbildung 7:** Eingangsbereich – FB 2

## Aufzug:



Kabinenmaß mind. 1,00m x 1,25m

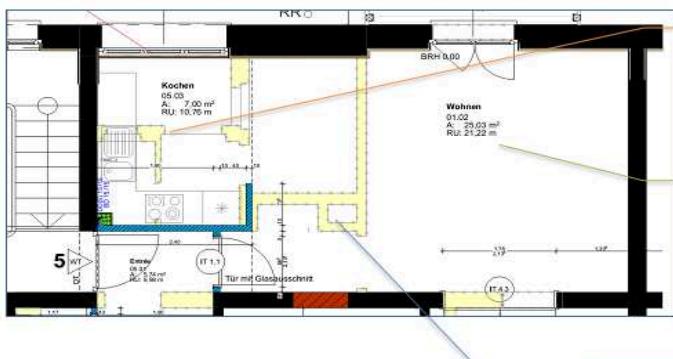
Kabinetture mind. 0,80m Durchgangsmaß

Bewegungsraum mind. 1,20m

Bedienung über Großtasten, auch Notruf

**Abbildung 8:** Vertikale Erschließung - FB 3

- Wohn- und Schlafräume und Küche



Bewegungstiefe  $\geq$  1,20m

Raumgröße  $\geq 14\text{m}^2$

Anpassung der Raumgeometrie

**Abbildung 9:** Anpassung der Raumgeometrie - FB 4



Abbildung 10: Anpassung an die Raumgeometrie- Bewegungsflächen FB 4

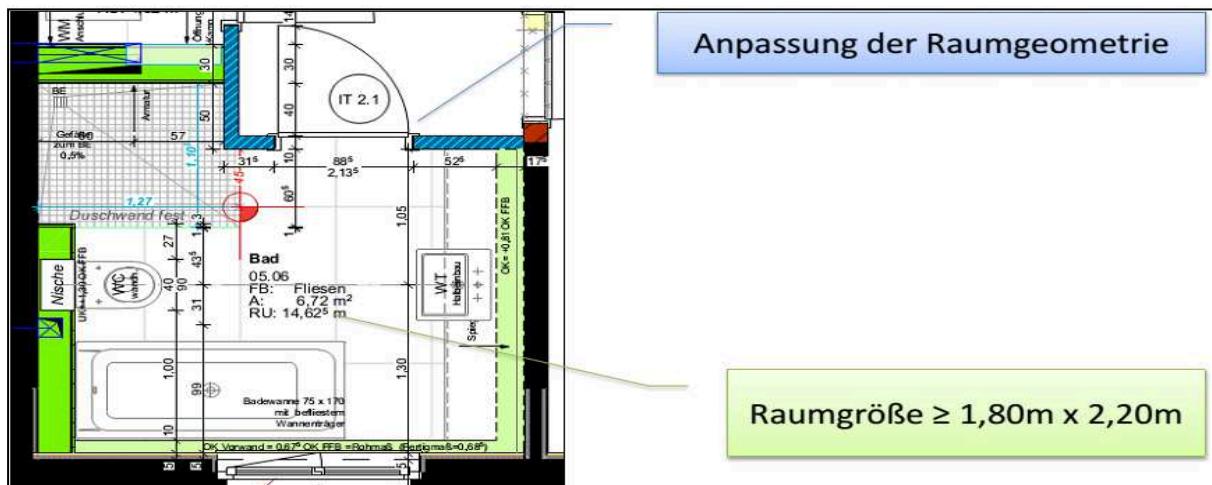


Abbildung 11: Sanitärräume – FB 5



Abbildung 12: Dusche- WC – Badewanne – FB 5



**Abbildung 13:** Bedienelemente – FB 6

Antragsberechtigt in den Programmen 159/455 sind private Eigentümer und Ersterwerber von Ein- und Zweifamilienhäusern oder Eigentumswohnungen. Im Programm 455 gibt es folgende Zuschüsse

**Tabelle3:** Zuschuss im Programm 455

Maßnahme	Zuschuss	Höchstbetrag pro WE
Einzelmaßnahme Barrierereduzierung	10%	5.000.-
Altersgerechtes Haus/ altersgerechte WE	12,5%	6.250.-
Einzelmaßnahme Einbruchschutz	10%	1.500.-

Im analogen Kreditprogramm 159 gelten folgende Konditionen:

**Tabelle 4:** Konditionen im Kreditprogramm 159

Höchstbetrag	50.000€ je WE
Zinssatz Stand 15.03.2017	0,75% - 1,16% effektiv je nach Laufzeit
Laufzeit	Bis zu 30 Jahre oder 8 Jahre endfällig
Zinsbindung	5 oder 10 Jahre
Tilgungsfreie Anlaufjahre	Max. 5 Jahre
Sicherheiten	Banküblich
Bereitstellungsprovision	4 Monate frei, danach 0,25% pro Monat
Sondertilgung	Gegen Vorfälligkeitsentschädigung
Kombination	Mit anderen KfW-Programmen und weiteren Fördermitteln möglich

## 2.6 Program 431 – Zuschuss Baubegleitung

Für alle Bauvorhaben kann im Programm 431 ein Zuschuss beantragt werden, sofern für das Bauvorhaben in den Programmen „Energieeffizient Sanieren“ oder „Energieeffizient Bauen“ bei der KfW ein Antrag gestellt wurde. Der Antrag ist online über: [www.kfw.de/431](http://www.kfw.de/431) vor Baubeginn zu stellen.

Antragsberechtigt sind alle Antragsteller in den Programmen und auch die Bauträger, wenn Enderwerber Anträge für das betreffende Bauvorhaben gestellt haben.

Förderfähig sind 50% der Kosten für energetische Fachplanung und Baubegleitung. Maximal können 8.000€ pro Gebäude beantragt werden – was zu einem Zuschuss von 4.000€ führt.

### 3 Zusammenfassung

Wie beispielhaft für den Wohnbau gezeigt wurde, kann durch optimierte Berechnung und Nutzung verschiedener Töpfe die Finanzierung deutlich verbessert werden. Nur wenn Sanierungen wirtschaftlich sind, werden Sie auch durchgeführt. Die Mittel sind hierfür bereitgestellt und sollen zur Verbesserung der energetischen Qualität auch genutzt werden.

#### Literatur

- [1] Europäische Gebäuderichtlinie. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L1/65 vom 4.1.2003 und Amtsblatt der Europäischen Union L 153/13 vom 18.6.2010
- [2] EnEV: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagetechnik bei Gebäuden, Berlin. Letzte Änderung Oktober 2015
- [3] Klimaschutzplan 2050, BMUB, Berlin, 11.11.2016
- [4] DIN V 4108-6 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2003
- [5] DIN V 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen- Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Beuth-Verlag, Berlin, August 2003
- [6] DIN V 18599; Energetische Bewertung von Gebäuden, Teil 1-11, Beuth-Verlag, Berlin, Dez. 2011, Berichtigung Mai 2013
- [7] Übersicht über Softwareprodukte zur Umsetzung der DIN V 18599 für Wohngebäude, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Referat B 13,11030 Berlin, 9.12.2014
- [8] DIN EN 12524 Baustoffe und –produkte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften –tabellierte Bemessungswerte 200-07
- [9] Innendämmung nach WTA I, Planungsleitfaden, Fraunhofer IRB Verlag, Ausgabe 05.2009/D
- [10] Kommunale Bestätigung als Teil der KfW-online Bestätigung zum Antrag
- [11] Anlage zu den Merkblättern Energieeffizient Sanieren – Kredit (151+152) und Investitionszuschuss (430), KfW, Stand 04/2016 Bestellnummer 600 000 3613
- [12] Makler- und Bauträgerverordnung (Verordnung über die Pflichten der Makler, Darlehensvermittler, Bauträger und Baubetreuer) In der Fassung der Bekanntmachung vom 07.11.1990 (BGBI. I S. 2479) zuletzt geändert durch Verordnung vom 02.05.2012 (BGBI. I S. 1006) m.W.v. 01.01.2013
- [13] KfW –Partnerportal – Präsentationen wohnwirtschaftliche Programme

# Fördermöglichkeiten für Innendämmung von Wohn- und Nichtwohngebäuden in Sachsen

Freia Frankenstein-Krug, Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

---

## 1. Einleitung

Die Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH ist ein Unternehmen des Freistaates Sachsen und der Sächsischen Aufbaubank - Förderbank.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der SAENA geben unabhängigen Rat. Sie informieren Sachsens Bürger, Unternehmen, Kommunen, Schulen und Kirchen zu den Themen erneuerbare Energien, zukunftsfähige Energieversorgung und zur bewussten effizienten Energienutzung.

Beratetelefon: 0351 4910-3179, [www.saena.de](http://www.saena.de)

## 2. Fördermöglichkeiten der Bundesregierung (deutschlandweit)

### 2.1 Fördermöglichkeiten bei der KfW

Im Rahmen des CO<sub>2</sub> – Gebäudesanierungsprogramms der Bundesregierung gibt es verschiedene Kredit-Programme für Wohn- und Nichtwohngebäudesanierungen. Im Bereich von Ein- und Zweifamilienhaussanierungen ist auch ein Zuschussprogramm verfügbar.

#### 2.1.1 IKK - Energetische Stadtsanierung - Energieeffizient Bauen und Sanieren (217, 218)

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Kreditinstitut der Wahl, welches KfW-Kredite durchleitet

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Kreditzusage möglich
- Laufzeit nach Wahl (z.B. 10,20,30 a), Zinssatz tagesaktuell (03/17: 0,05%)
- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 70, 100 oder Denkmal oder Einzelmaßnahmen bei Nichtwohngebäuden
- Bei Einzelmaßnahmen max. Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils 0,020 bis 0,065 W/m<sup>2</sup>K, abhängig von Lage im Gebäude bzw. Bauart; bei Denkmälern Abweichungen möglich
- Einbindung eines Sachverständigen zur Antragstellung sowie zum Nachweis der Mittelverwendung
- Tilgungszuschüsse zwischen 5% und 17,5% des Zusagebetrages, höchstens 175 €/m<sup>2</sup>, 3 Monate nach Prüfung und Anerkennung der Bestätigung nach Durchführung
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Kommunale Gebietskörperschaften
- Rechtlich unselbstständige Eigenbetriebe der kommunale Gebietskörperschaften
- Gemeindeverbände wie kommunale Zweckverbände

### **2.1.2 IKU - Energetische Stadtsanierung - Energieeffizient Bauen und Sanieren (220, 219)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Kreditinstitut der Wahl, welches KfW-Kredite durchleitet

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Kreditzusage möglich
- Laufzeit nach Wahl (z.B. 10,20,30 a)
- Zinssatz tagesaktueller Produktzinssatz, der individuelle Zinssatz wird anhand der wirtschaftlichen Verhältnisse und der Qualität der Sicherheiten ermittelt (03/17: 1% – 7,68%)
- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 70, 100 oder Denkmal oder Einzelmaßnahmen bei Nichtwohngebäuden
- Bei Einzelmaßnahmen max. Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils 0,020 W/m<sup>2</sup>K bis 0,065 W/m<sup>2</sup>K, abhängig von Lage im Gebäude bzw. Bauart; bei Denkmälern Abweichungen möglich
- Einbindung eines Sachverständigen zur Antragstellung sowie zum Nachweis der Mittelverwendung
- Tilgungszuschüsse zwischen 5% und 17,5% des Zusagebetrages, höchstens 175 €/m<sup>2</sup>, 3 Monate nach Prüfung und Anerkennung der Bestätigung nach Durchführung
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Unternehmen mit mehrheitlich kommunalem Gesellschafterhintergrund
- Gemeinnützige Unternehmen und Kirchen
- Unternehmen unabhängig von Rechtsform und Beteiligungsverhältnissen
- natürliche Personen im Rahmen von Öffentlich-privaten Partnerschaften

### **2.1.3 Energieeffizienzprogramm – Energieeffizient Bauen und Sanieren (276, 277, 278)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Kreditinstitut der Wahl, welches KfW-Kredite durchleitet

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Kreditzusage möglich
- Laufzeit nach Wahl (z.B. 5,10,20 a)
- Zinssatz tagesaktueller Produktzinssatz, der individuelle Zinssatz wird anhand der wirtschaftlichen Verhältnisse und der Qualität der Sicherheiten ermittelt (03/17: 1 – 7,55%)

- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 70, 100 oder Denkmal oder Einzelmaßnahmen bei Nichtwohngebäuden
- Bei Einzelmaßnahmen max. Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils 0,020 bis 0,065 W/m<sup>2</sup>K, abhängig von Lage im Gebäude bzw. Bauart; bei Denkmälern Abweichungen möglich
- Einbindung eines Sachverständigen zur Antragstellung sowie zum Nachweis der Mittelverwendung
- Tilgungszuschüsse zwischen 5 und 17,5% des Zusagebetrages, höchstens 175 €/m<sup>2</sup>, 3 Monate nach Prüfung und Anerkennung der Bestätigung nach Durchführung
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller:

- In- und ausländische Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, die sich mehrheitlich in Privatbesitz befinden
- Contracting-Geber, die Energie-Dienstleistungen an gewerblichen Nichtwohngebäuden erbringen
- Freiberuflich Tätige

#### **2.1.4 Energieeffizient Bauen und Sanieren - Kredit (151/152)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Kreditinstitut der Wahl, welches KfW-Kredite durchleitet

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Kreditzusage möglich
- Laufzeit nach Wahl (z.B. 10,20,30 a); Zinssatz tagesaktuell (03/17: 0,75%)
- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 55,70,100,115 oder Denkmal oder Einzelmaßnahmen bei Wohngebäuden
- Bei Einzelmaßnahmen max. Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils 0,065 W/m<sup>2</sup>K; bei Denkmälern Abweichungen möglich
- Einbindung eines Sachverständigen zur Antragstellung sowie zum Nachweis der Mittelverwendung
- Tilgungszuschüsse zwischen 7,5 und 27,5 % der Darlehenssumme, bis zu 27.500 Euro für jede Wohneinheit, 3 Monate nach Prüfung und Anerkennung der Bestätigung nach Durchführung
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Bauherren, die eine Wohnimmobilie sanieren
- Ersterwerber von saniertem Wohnraum
- Contracting-Geber

## **2.1.5 Energieeffizient Bauen und Sanieren - Zuschuss (430)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- KfW Bankengruppe über Online-Zuschussportal
- [www.kfw.de/zuschussportal](http://www.kfw.de/zuschussportal)

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Kreditzusage möglich
- Laufzeit nach Wahl (z.B. 10,20,30 a)
- Zinssatz tagesaktuell (03/17: 0,75%)
- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 55, 70, 100, 115 oder Denkmal oder Einzelmaßnahmen bei Ein- und Zweifamilienhäusern
- Bei Einzelmaßnahmen max. Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils 0,065 W/m<sup>2</sup>K; bei Denkmälern Abweichungen möglich
- Einbindung eines Sachverständigen zur Antragstellung sowie zum Nachweis der Mittelverwendung
- Tilgungszuschüsse zwischen 7,5 und 27,5 % der Darlehenssumme, bis zu 27.500 Euro für jede Wohneinheit, 3 Monate nach Prüfung und Anerkennung der Bestätigung nach Durchführung
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Eigentümer eines Ein- oder Zweifamilienhauses mit maximal 2 Wohneinheiten oder einer Wohnung
- Ersterwerber eines sanierten Ein- oder Zweifamilienhauses oder einer sanierten Wohnung
- Eine Wohnungseigentümergemeinschaft aus Privatpersonen

## **2.2. Fördermöglichkeiten in der Kommunalrichtlinie**

Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen (Kommunalrichtlinie) im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit vom 22.06.2016

### **Fördertatbestand nach VI. der Richtlinie: - Dämmung von Heizkörpernischen**

- Antrags- und Bewilligungsstelle:  
Projektträger Jülich (PtJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Geschäftsbereich Klima (KLI)  
Zimmerstraße 26 – 27  
10969 Berlin  
Telefon: 0 30/20 19 95 77  
Telefax: 0 30/2 01 99 31 00  
E-Mail: [ptj-ksi@fz-juelich.de](mailto:ptj-ksi@fz-juelich.de)  
<https://www.ptj.de/klimaschutzinitiative-kommunen/klimaschutzinvestitionen>
- Antragsfristen: 01.01.-31.03. und 01.07.-30.09. möglich

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt des Förderbescheides möglich
- Max. Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials 0,035 W/mK
- Fachgerechte Montage und besondere Beachtung des Feuchteschutzes
- Bestätigung eines Fachplaners nach Ausführung
- Förderquote bis 40%, finanzschwache Kommunen bis 52%
- Keine Kumulierung mit anderen Förderprogrammen der Bundesregierung

Antragsberechtigte Antragsteller

- Kommunen (Städte, Gemeinden und Landkreise) und Zusammenschlüsse, an denen ausschließlich Kommunen beteiligt sind
- Öffentliche, gemeinnützige und religiösgemeinschaftliche Kindertagesstätten und Schulen (nicht umfasst Volkshochschulen) bzw. deren Träger
- Öffentliche und freie, gemeinnützige Einrichtungen der Kinder- und Jugendhilfe, die nach SGB VIII anerkannt sind, bzw. deren Träger
- Betriebe, Unternehmen und sonstige Organisationen mit mindestens 50,1 % kommunaler Beteiligung; für kommunale Eigenbetriebe ohne eigene Rechtspersönlichkeit ist die jeweilige Kommune antragsberechtigt
- Sportvereine mit Gemeinnützigkeitsstatus, die im Vereinsregister eingetragen sind

### **3. Fördermöglichkeiten in Sachsen**

#### **3.1. Fördermöglichkeiten RL Klima/ 2014 – Stufenweise und komplexe Sanierung (Ziffer B.I.1 RL)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Sächsische Aufbaubank – Förderbank-  
Pirnaische Straße 9  
01069 Dresden  
Tel. 0351 / 4910 0  
Fax 0351 / 4910 4000  
E-Mail: [servicecenter@sab.sachsen.de](mailto:servicecenter@sab.sachsen.de)  
<https://www.sab.sachsen.de/öffentliche-kunden/energie-umwelt/>

Bedingungen:

- Beginn der Maßnahme erst nach Erhalt der Zusage möglich, mögliche Ausnahmen sind bei der Antrags- und Bewilligungsstelle abzustimmen
- Anlehnung an die Technischen Mindestanforderungen der KfW 217/ 218
- Komplexe Sanierung zum Effizienzhaus 70, 100 oder Denkmal bei Nichtwohngebäuden
- Einbindung eines Sachverständigen analog zur KfW
- Kumulierung mit Förderprogrammen der KfW möglich

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Kommunale Gebietskörperschaften und deren Unternehmen
- Verbandskörperschaften
- Gemeinnützige Organisationen sowie anerkannte Religiösgemeinschaften

### **3.2. Fördermöglichkeiten RL Energie/ 2014 – Steigerung der Energieeffizienz (Ziffer II.Nr.1 RL)**

Antrags- und Bewilligungsstelle:

- Sächsische Aufbaubank – Förderbank-  
Pirnaische Straße 9  
01069 Dresden  
Tel. 0351 / 4910 0  
Fax 0351 / 4910 4000  
E-Mail: [servicecenter@sab.sachsen.de](mailto:servicecenter@sab.sachsen.de)  
<https://www.sab.sachsen.de/öffentliche-kunden/energie-umwelt/>

Bedingungen:

- Energetische Sanierung von Betriebsgebäuden, es muss ein Zustand erreicht werden, bei dem die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 24.07.2007 in der z. Z. d. Antragstellung geltenden Fassung um mindestens 10 % überboten werden

Antragsberechtigte Antragsteller:

- Kleinstunternehmen sowie kleine und mittlere Unternehmen, sofern diese im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistung tätig sind und keine Beteiligung der öffentlichen Hand an dem Unternehmen besteht

### **3.3. Förderrichtlinie Ländliche Entwicklung – RL LE/ 2014**

Nach einem jeweiligen thematischen Aufruf in den sächsischen LEADER-Regionen können sich passende Projekte bewerben. Gemeinden in LEADER-Gebieten können ab Bekanntgabe eines solchen Aufrufs Anträge bei den Bewilligungsbehörden der Landkreise stellen. Das Vorhaben muss im Einklang mit den Zielen der LEADER-Entwicklungsstrategie des jeweiligen LEADER-Gebietes stehen.

<http://www.smul.sachsen.de/foerderung>

### **3.4. weitere Fach-Förderrichtlinien, u.a.**

- Förderrichtlinie SchullInfra – FöriSIF (05/2015-12/2017)
- RL Nachhaltige Stadtentwicklung EFRE 2014 bis 2020 (05/2015-12/2017)
- VwV Kita Bau (03/2017)
- Sportförderrichtlinie (08/2015-12/2017)

# Nutzung bestehender Berechnungsmethodiken bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen (z. B. BNB)

Uwe Kluge, Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH

---

## 1. Einleitung

Die Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH ist ein Unternehmen des Freistaates Sachsen und der Sächsischen Aufbaubank - Förderbank -.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der SAENA geben unabhängigen Rat. Sie informieren Sachsens Bürger, Unternehmen, Kommunen, Schulen und Kirchen zu den Themen erneuerbare Energien, zukunftsfähige Energieversorgung und zur bewussten effizienten Energienutzung.

Beratetelefon: 0351 4910-3179, [www.saena.de](http://www.saena.de)

## 2. Inhalt

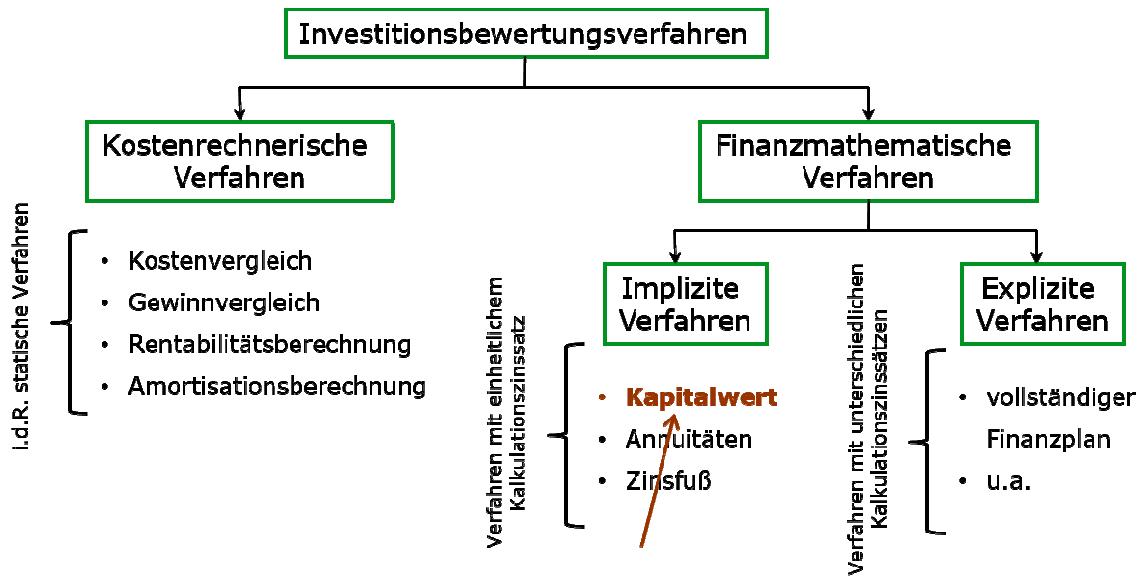
Mit den nationalen Beschlüssen zum Klimaschutz und den daraus resultierenden Verordnungen und Gesetzen zur Umsetzung dieser Anforderungen in der Praxis ist das Thema Wirtschaftlichkeit wieder in den Focus der öffentlichen Diskussion gerückt. Insbesondere die in EnEV und EEWaermeG definierten Befreiungstatbestände zur Befreiung des Verpflichteten von den verordnungsrechtlich bzw. gesetzlich formulierten Standards im Falle des Vorliegens unbilliger Härten (§ 25 EnEV, §9 EEWaermeG), erfordern regelmäßig die Durchführung von betriebswirtschaftlichen Berechnungen zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit.

Weiterhin haben insbesondere Eigentümer und Investoren ein hohes Interesse, sich auf der Basis fundierter betriebswirtschaftlicher Variantenvergleiche für den für sie passenden energetischen Standard entscheiden zu können.

Häufig bestehen jedoch sowohl beim Ersteller der Berechnung wie auch beim Auftraggeber erhebliche Unsicherheiten in der anzuwendenden Berechnungsmethodik und den anzusetzenden Berechnungsrandbedingungen.

Im Bereich der Energieeffizienz von Gebäuden existieren eine Reihe verschiedener Betrachtungsmodelle für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der energetischen Qualität eines Gebäudekonzeptes. Jedoch ist nicht jede der Berechnungsvarianten für jeden Anwendungsfall gleich gut geeignet. Die Wahl der Berechnungsrandbedingungen beeinflusst erheblich die Berechnungsergebnisse.

## Grundprinzipien von Wirtschaftlichkeitsberechnungen



**Abbildung 1:** Die Grundprinzipien von Wirtschaftlichkeitsberechnungen

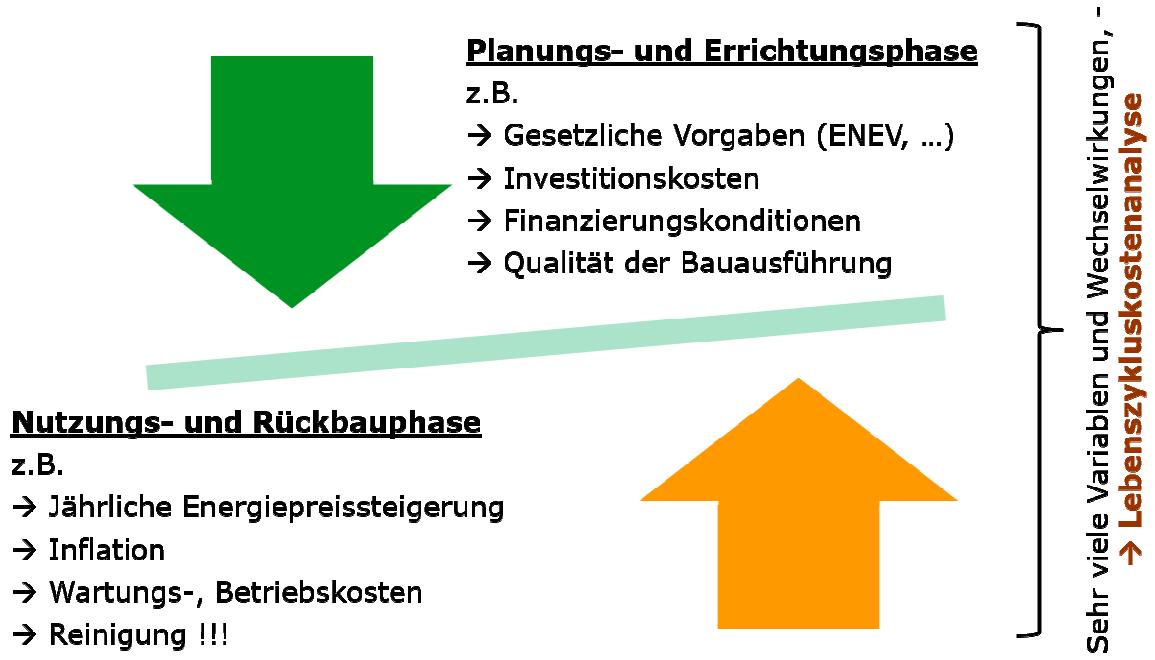
Welche Art von Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den jeweiligen Einzelfall geeignet ist hängt zu aller erst von der Aufgabenstellung ab.

Beispiele hierfür sind z.B.

- Risikobetrachtung
- Fallentscheidung bei Vorliegen unterschiedlicher Varianten bzw. Alternativen
- Ermittlung der Lebenszykluskosten
- Ermitteln exakter finanzmathematischer Kenndaten für Unternehmensbilanzen

Eine sehr elegante und fundierte Möglichkeit, unterschiedliche energetische Standards betriebswirtschaftlich miteinander zu vergleichen, bietet die Methode der Lebenszykluskostenermittlung innerhalb des Bewertungssystems für Nachhaltiges Bauen (BNB) des BMUB.

Gebäude verursachen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg hohe Kosten. Dies bezieht sich sowohl auf die Errichtung, die Nutzung und den Rückbau. Ein wirtschaftlicher Umgang mit finanziellen Ressourcen erfordert für den Bereich Errichten und Betreiben die Minimierung der gebäudebezogenen Kosten im gesamten Lebenszyklus.



**Abbildung 2:** Die Lebenszykluskostenanalyse

Die Methodik der Lebenszykluskostenermittlung nach BNB liefert durch eine sehr detaillierte Systematik zu den Kostenarten, Austauschzyklen für Bauteile, Anlagen und Aggregate innerhalb der Lebensdauer, klaren Vorgaben zu Kalkulationszinsraten, Preissteigerungsraten sowie Annahmen für Wartung, Betrieb und Reinigungskosten eine belastbare Analysemöglichkeit für die wirtschaftliche Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in und an Gebäuden. Diese kann sehr gut auf ähnliche gelagerte Aufgabenstellungen im Gebäudektor übertragen werden.

# Monitoring im „Alten Zöllnerviertel Weimar“ Bauwerksperformance / Nutzerverhalten – ein Praxisbericht

Dipl.-Ing. Andreas Söhnchen, Institut für Bauklimatik der TU Dresden  
Dr.-Ing. Karin Rühling, Institut für Energietechnik der TU Dresden

## 1 Einleitung

Das Gebäudeensemble „Altes Zöllnerviertel“ in Weimar befand sich im Vorfeld des Projektes vollständig im Besitz der Max-Zöllner-Stiftung – einer Stiftung zur Unterstützung und Förderung von Menschen mit Sinnesbeeinträchtigung. Drei der sechs denkmalgeschützten Mehrfamilienhäuser standen vor Projektstart mehrere Jahre leer, zwei weitere wurden als Schule für sehbehinderte Kinder und als Hort genutzt. Die Ziele der von der Stiftung angestrebten Quartierslösung umfassten u.a.

- Eine anspruchsvolle energetische Sanierung der Gebäude (Innendämmung der Gebäudehülle, Erneuerung der Fenster, Dämmung der Kellerdecke und der obersten Geschossdecke, Implementation einer innovativen Anlagentechnik)
- Die barrierefreie Gestaltung der Gebäude (niveaugleiche Erschließung, Ein-/Anbau von Aufzügen)
- Die Umsetzung eines anspruchsvollen Versorgungskonzeptes zur Nahwärmeversorgung unter Einbeziehung kommunaler Bauten (Schule, Kita, Kirche) und weiterer neu zu errichtender Wohngebäude



**Abbildung 1:** Ansicht eines der Gebäude – links vor / rechts nach der Sanierung

Die Sanierungsmaßnahmen starteten nach umfassenden Planungen im Jahr 2013. In Absprache mit der Geschäftsführung und dem Vorstand der Max-Zöllner-Stiftung wurde durch die TU Dresden und weitere Partner begleitend ein Projektantrag zur Realisierung eines komplexen Monitoring-Systems beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gestellt. Das Monitoring-Konzept verfügt über verschiedene Ebenen und umfasste

- Die messtechnische Untersuchung und Bewertung konstruktiver Details in Bezug auf die Wirksamkeit und Schadensfreiheit der verwendeten Lösungen zur Innendämmung
- Die Erfassung von Verbrauchsdaten zum Vergleich der geplanten Energiebedarfswerte mit den tatsächlichen Verbräuchen
- Eine Analyse des Nutzerverhaltens anhand flächendeckend erfasster Messwerte zum Raumklima und zum Lüftungsverhalten der Nutzer

Der Zuwendungsbescheid wurde im September 2013 erteilt, die dreijährige Projektlaufzeit startete planmäßig am 1. Oktober 2013. Mit zunehmendem Projektfortschritt wurde allerdings deutlich, dass insbesondere die Umsetzung des Versorgungskonzeptes an kommerziell-juristischen Fragen scheitern würde. Der Tatbestand zur Förderung des Projektes im Rahmen des Programms EnEff:Stadt war damit nicht mehr gegeben, der Zuwendungsbescheid wurde zum 31. Dezember 2014 widerrufen.

Bis zu diesem Zeitpunkt waren jedoch die baubegleitenden Maßnahmen zur Vorrüstung von Monitoringelementen (Bauteilmessstrecken, Kabelstränge, spezielle M-Bus-fähige Zähler, Fensteröffnungskontakte etc.) in den Gebäuden weit fortgeschritten. Auf Initiative der TU Dresden wurde daher mit Unterstützung durch das Ministerium und den Projektträger Jülich ein Folgeprojekt beschrieben und beantragt, welches – abgesehen vom Monitoring eines Nahwärmennetzes und der darin integrierten Erzeugerstrukturen – eine nahezu vollständige Umsetzung des ursprünglichen Projektansatzes beinhaltet. Das Projekt wurde unter dem Titel „Altes Zöllnerviertel Weimar“ *Integriertes Monitoring: Versorgung – Nutzer – Bauteil (IMoSUB)* im Rahmen von EnOB:Monitor eingereicht. Der Zuwendungsbescheid wurde im April 2015 erteilt. Die neue Projektlaufzeit von 2,5 Jahren startete am 1. Mai 2015.

## **2 Das Monitoring-Konzept – Herausforderung: „Re-Design“**

Die geänderten Randbedingungen machten eine komplett Neustrukturierung des Projektes erforderlich. So stand vor allem das ehemals üppige Budget für die Vergabe eines Unterauftrages zur Einrichtung und zum Betrieb des Gesamtsystems nicht mehr zur Verfügung. Es mussten daher zunächst kostengünstige Alternativlösungen zur Datenerfassung und -übermittlung entwickelt werden.

Als zusätzliche „Chance“ für das neue Projekt wirkten sich die drastisch gestiegenen Sanierungskosten aus. Während das erste Gebäude noch mit der aufwendig geplanten Haustechnik ausgestattet wurde, mussten bei den beiden anderen Gebäuden Abstriche in Kauf genommen werden (Konvektionsheizung statt Deckenstrahlheizung, geändertes Konzept zur Warmwasserversorgung etc.). Somit stehen für die Untersuchungen prinzipiell ähnliche Gebäude mit unterschiedlichen Sanierungsstandards zur Verfügung. Eine weitere interessante Situation ergab sich mit der Veräußerung eines der beiden weniger aufwendig sanierten Gebäude durch die Stiftung. Da der Erwerber erst Mitte 2016 mit Verkauf bzw. Vermietung begann, steht ein Gebäude für eine komplette

Heizperiode (2015/2016) als „nutzerbereinigtes“ Untersuchungsobjekt zur Verfügung.

## 2.1 Anpassung der Erfassungstechnik / Sensorik

Der neue Systemansatz basiert auf drei wesentlichen Säulen. Die Erfassung sämtlicher Verbrauchsdaten erfolgt wie bisher vorgesehen mittels M-Bus-fähiger Geräte. Hierzu waren lediglich einige Ergänzungen im Bereich der zentralen Strukturen und der Stromversorgung notwendig.

Für die Messungen an Bauteilen (konstruktive Details im Bereich von Fenstern, Gebäudeecken und einbindenden Wänden bzw. Decken) kommen die ebenfalls überwiegend bereits vorgerüsteten Komponenten der Fa. AHLBORN Messgeräte-technik zum Einsatz.

Gravierende Veränderungen mussten allerdings im Bereich der Raumklimaerfassung und des Lüftungsmonitorings sowie zur Temperaturmessung an den Trinkwasser-Entnahmestellen vorgenommen werden. Die Verwendung der ehemals geplanten M-Bus-Komponenten war finanziell nicht darstellbar, so dass alternative Sensoren eingesetzt und eigene Erfassungskonzepte und Softwarelösungen entwickelt werden mussten. Zur Erfassung des Raumklimas wurden schließlich Sensoren des Typs DHT22 ausgewählt. Die Erfassung des Fensteröffnungsstatus erfolgt nunmehr über eine Widerstandsmessung und deren Auswertung mit einem DA-Wandler. Die Temperaturen der Warm- und Kaltwasserleitungen werden mittels 1wire-Temperatursensoren gemessen.

Für die Erfassung der Messwerte der drei letztgenannten Monitoringkomponenten kommen spezielle Softwarelösungen des Instituts für Bauklimatik (IBK) zum Einsatz. Die Implementierung der Software erfolgte auf der linux-basierten Plattform “Raspbian” des Einplatinenrechners **Raspberry Pi® Modell B+**. Pro Wohneinheit wurde ein entsprechendes Gerät in einer speziell dafür eingerichteten Box installiert. Die nachfolgenden Tabellen beinhalten das Mengengerüst für die in den unterschiedlichen Teilbereichen den Monitoring verbauten Sensoren.

**Tabelle 1:** Installierte M-Bus-Zählgeräte

Geräteart	Anzahl	Messintervall
Wärmemengenzähler	28 innerhalb der Wohnungen 3 in zentralen Einheiten	60 Sekunden
Warmwasserzähler	47 innerhalb der Wohnungen	60 Sekunden <sup>1)</sup>
Kaltwasserzähler	47 innerhalb der Wohnungen	
Gaszähler	3 in zentralen Einheiten	60 Sekunden
Stromzähler	28 Wohnungsbezogen 3 in zentralen Einheiten	60 Sekunden

<sup>1)</sup> Bei zusätzlichen (abgesetzten) Wasserentnahmestellen musste das Intervall wegen technischer Restriktionen (Begrenzung durch den Hersteller) auf 30 Minuten verlängert werden.

**Tabelle 2:** Übersicht alternativer Messkomponenten “Nutzerverhalten”

Messgegenstand	Sensortyp	Anzahl	Messintervall
Raumklima (T, rH)	DHT 22	140 Räume	60 Sekunden
Warmwasser-temperatur	1wire-Temperatursensor	35 Zapfstellen	30 Sekunden
Kaltwasser-temperatur		35 Zapfstellen	
Fensteröffnungs-status	Widerstandsmessung mittels AD-Wandler	104 Räume	eventgesteuert

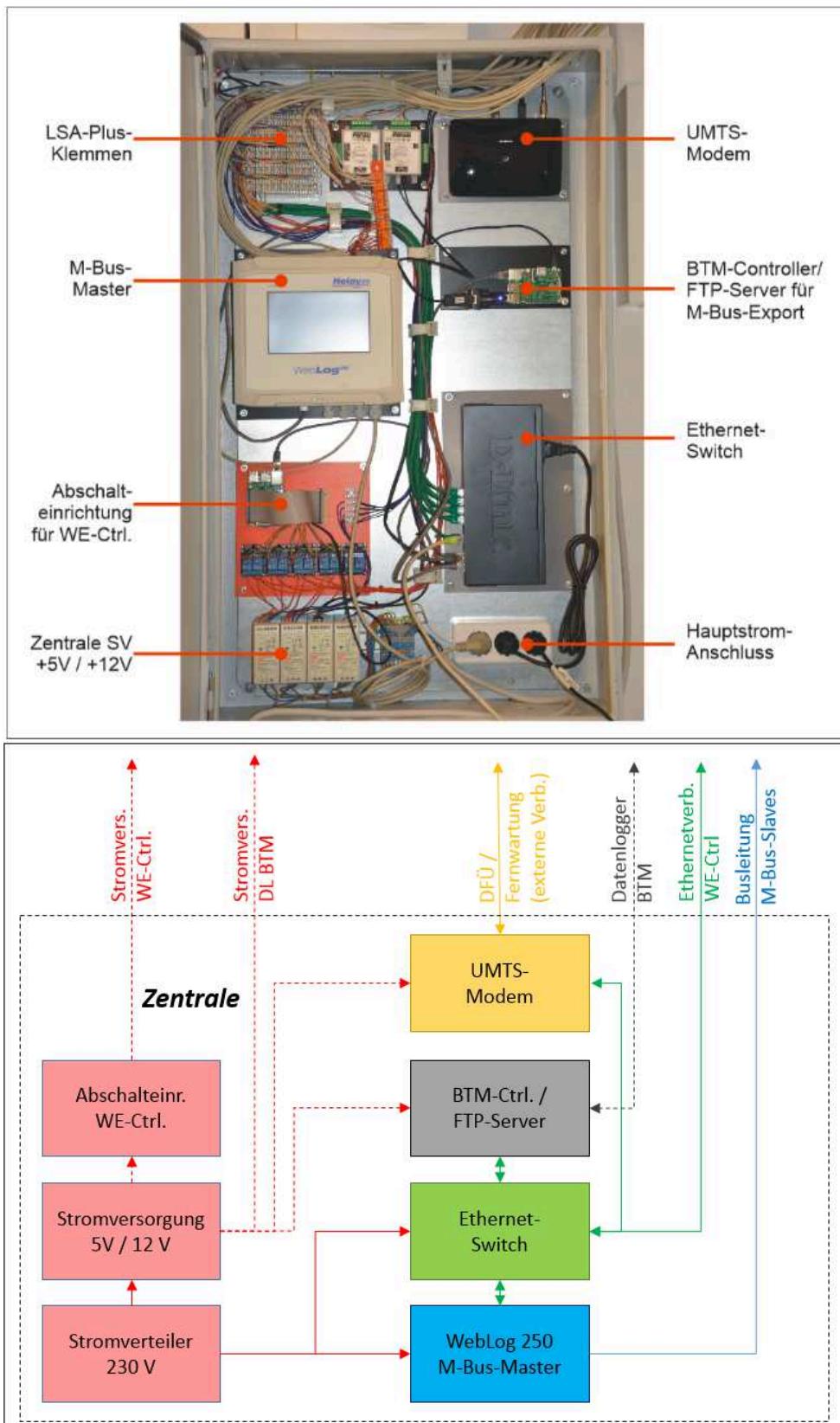
**Tabelle 3:** Sensortechnik für das Bauteilmonitoring

Sensorart	Anzahl	Messintervall
Kombifühler (T, rH) in der Konstruktion	40	60 Sekunden
Oberflächen-temperaturfühler	36	60 Sekunden
Wärmestromplatten	3	60 Sekunden
Außenklimafühler (T, rH, p)	2	60 Sekunden

Die Vernetzung der Geräte innerhalb der Gebäude zur Zentrale im Keller erfolgte mittels Ethernet. Hierzu wurden die zahlreich verlegten J-Y(ST)Y-Telefonkabel erfolgreich getestet und schließlich verwendet. Über diese Kabel wurde ebenfalls die Stromversorgung der Geräte in den Wohneinheiten vom Keller aus realisiert. Dies eröffnet unter anderem den Vorteil, dass Rechner in den Wohneinheiten abgeschaltet bzw. kaltgestartet werden können, ohne direkt in der Wohnung aktiv werden zu müssen.

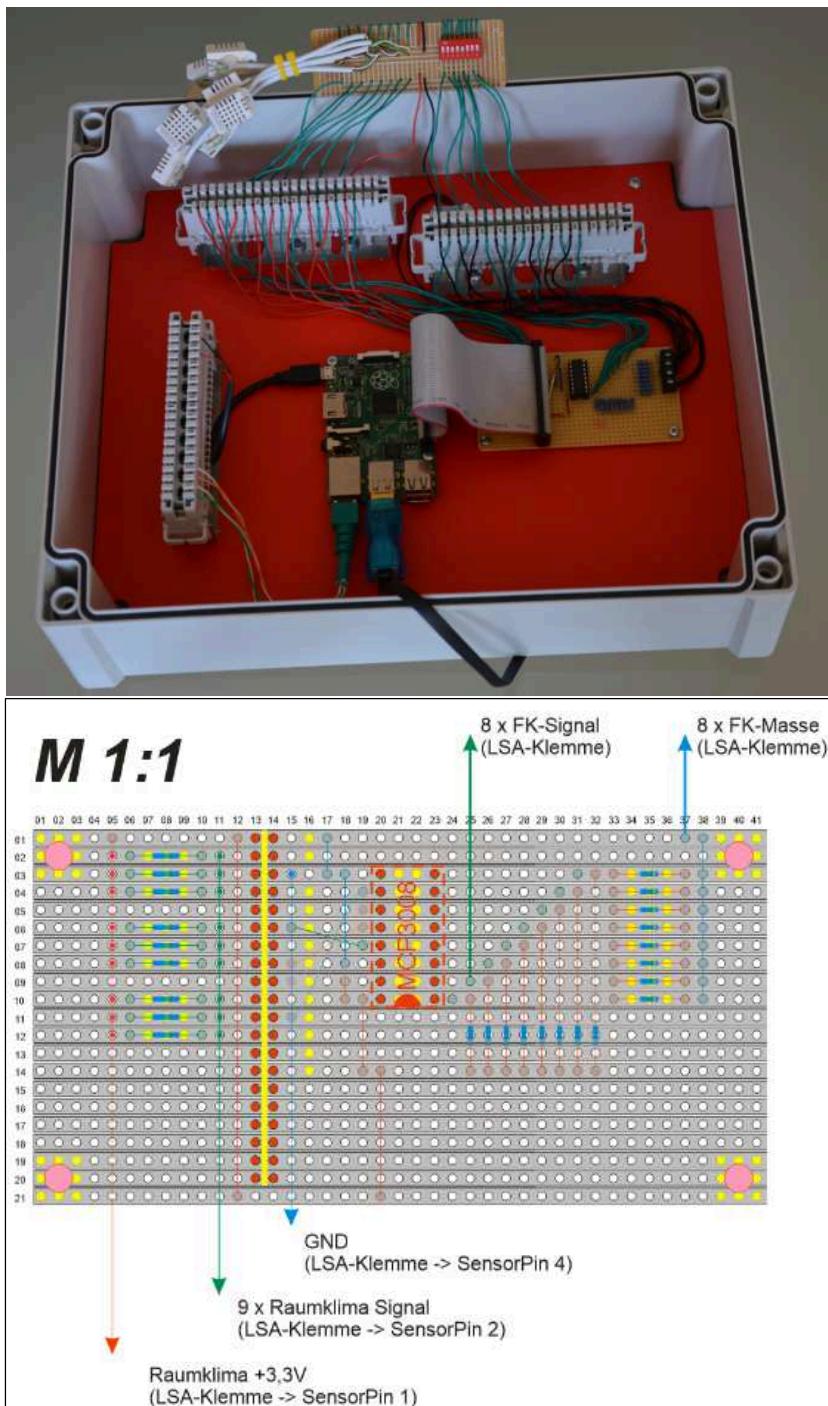
Der ursprüngliche Ansatz sah eine zentrale Struktur für das gesamte Quartier vor, in der die Datenerfassung und -übertragung von einer einzigen Zentrale (in Gebäude 1) gesteuert wird. Die dafür notwendige Vernetzung der Gebäude mittels Erdkabel ließ sich zu Beginn des neuen Projektes nicht mehr umsetzen. Folglich mussten Überlegungen zur Realisierung einer dezentralen Systemarchitektur geführt werden. Diese mündeten in einer UMTS-basierten Datenübertragung über verteilte Hauszentralen nach Dresden, welche täglich kurz nach 0.00 Uhr erfolgt und somit eine gute Kontrollmöglichkeit des Datenflusses bietet.

Zur Fernwartung wurden schließlich entsprechende Wartungszyklen eingerichtet, in denen die Zentralrechner in den Gebäuden von Dresden aus erreichbar sind. „Abbildung 2“ zeigt den Aufbau der jeweils pro Gebäude installierten Zentrale.



**Abbildung 2:** Foto einer installierten Zentrale im Keller des Gebäudes 3 (oben), schematischer Aufbau der Zentrale (unten)

„Abbildung 3“ enthält eine Ansicht eines Anschlusssets, welches in den Wohnungen verwendet wurde. Erkennbar sind die Klemmleisten, der Einplatinenrechner sowie die Platine zur Anbindung der DHT22-Sensoren und der Fensteröffnungskontakte.



**Abbildung 3:** Ansicht WE-Anschlusset – an den horizontal angeordneten Klemmleisten befindet sich eine Testbeschaltung mit DHT22-Sensoren und „Fensterkontakte“. Unten im Bild: Prinzipschaltbild zur Anbindung der Sensoren an den Einplatinenrechner

## **2.2 Aussagen zur Qualität der erfassten Messdaten**

Eine generelle Herausforderung stellt die Sicherung einer gleichbleibenden Qualität der erfassten Messgrößen dar. Hier spielen verschiedenste Faktoren – angefangen vom (zeitweiligen) Ausfall einzelner Sensoren / Baugruppen, über Stromausfälle und Netzschwankungen (die Klassiker unter den Datenräubern schlechthin) bis hin zu Störungen der Übertragungswege – eine kaum zu beeinflussende Rolle (im vorliegenden Fall fiel das E-Plus-Netz im betroffenen Bereich im Dezember 2016 komplett aus und wurde erst Mitte Januar 2017 wieder verfügbar).

Dennoch konnte – nicht zuletzt auf der Basis regelmäßiger Überprüfungen der eingegangenen Daten – eine hohe Kontinuität der Datenerfassung gewährleistet werden. Auftretende Unsicherheiten wurden in den meisten Fällen rasch erkannt und beseitigt. Bis auf wenige unkritische Ausnahmen stützen sich die nachfolgenden Auswertungen auf eine zeitliche Datenverfügbarkeit von > 98 %. Aufgrund der hohen Auflösung der Datenerfassung (Intervalle 30 ... 60 Sekunden) können belastbare Mittelwerte für die Beurteilung verschiedenster Effekte und zur Beantwortung komplexer Fragestellungen herangezogen werden.

## **3 Messergebnisse**

Wenngleich die Messungen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht abgeschlossen sind, sollen nachfolgend erste Ergebnisse exemplarisch zusammengetragen werden. Insbesondere für den Bereich Bauteilmonitoring können Aussagen zum hygrothermischen Verhalten der Konstruktion bereits relativ sicher auf der Basis der erfassten Primärdaten getroffen werden.

Die Verschneidung verschiedener Informationen aus den Bereichen Bauteilmonitoring, Nutzerverhalten und Energiebedarfsanalyse erfolgt in den folgenden Monaten bis zum Projektende im 4. Quartal 2017. Dennoch sollen auch hierzu erste Trends analysiert und beschrieben werden.

### **3.1 Messergebnisse Bauteilmonitoring**

Eines der Hauptkriterien zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit diffusionsoffener, kapillaraktiver Innendämmlösungen ist der Feuchtegehalt in der Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Dämmung. Es muss gewährleistet werden, dass die in der Winterperiode anfallende Feuchte im darauffolgenden Sommer wieder austrocknen kann. Um dies messtechnisch zu unterstützen, werden in der Regel sogenannte Kombifühler (Temperatur / relative Luftfeuchte) in diesem Bereich angeordnet.

„Abbildung 4“ beinhaltet eine Prinzipskizze für den Aufbau einer Messstrecke. Neben den Temperaturen und relativen Luftfeuchten in der Kleberebene werden weitere Größen erfasst, die zur Nachrechnung der Messergebnisse mittels Delphin als Randbedingungen oder auch als Prüfgrößen benötigt werden. Ebenfalls in der Abbildung zu sehen ist ein Foto zum Zeitpunkt der Implementation

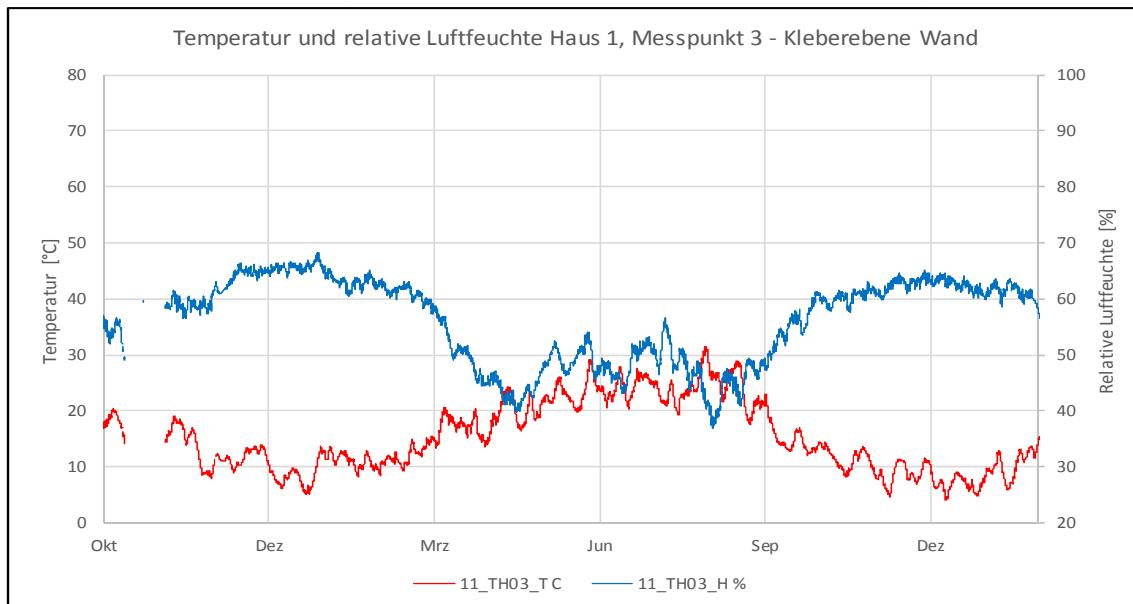
der Kombifühler. Es hat sich als praktikabel erwiesen, die Fühler erst nach Einbau der Dämmung „nachzurüsten“ – auf diese Weise kann vermieden werden, dass die Fühler mechanisch beschädigt werden.



**Abbildung 4:** Prinzipskizze einer Messstrecke (links) und Einbau der Kombifühler hinter der Innendämmung (rechts)

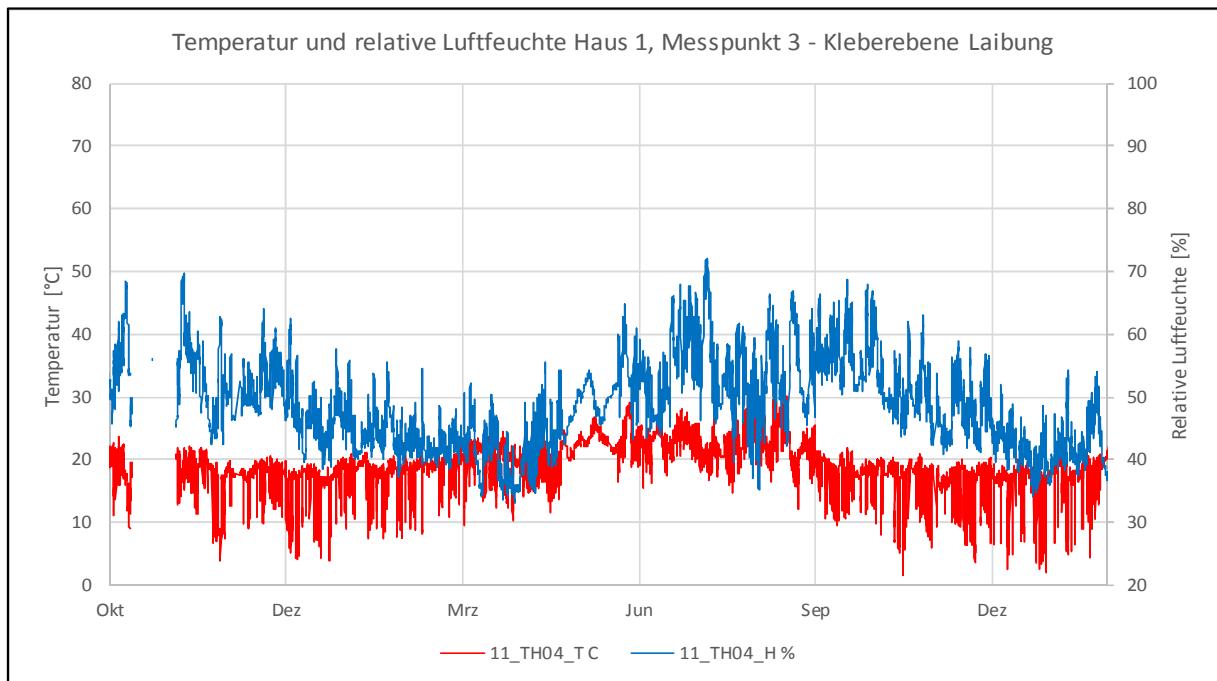
Nachfolgend werden ausgewählte Messergebnisse beispielhaft an einer Messstrecke aus Haus 1 dargestellt und kommentiert. Neben den Randbedingungen sollen dabei insbesondere die Ergebnisse der Kombifühler näher betrachtet werden.

„Abbildung 5“ zeigt die hygrothermischen Zustände in der Kleberegion an einem ungestörten Wandquerschnitt. Die relative Luftfeuchte erreicht in der Winterperiode Maximalwerte von ca. 70 %. In der anschließenden Sommerperiode kann die Konstruktion gut austrocknen, so dass von einer dauerhaften Schadensfreiheit ausgegangen werden kann.



**Abbildung 5:** Ganglinien der Temperatur und der relativen Luftfeuchte in der Kleberegion am ungestörten Wandquerschnitt

Ähnliche Aussagen können anhand der Messergebnisse im Bereich der Fensterlaibung getroffen werden. Die Temperaturen schwanken hier stärker, was auf die geringere Dämmstärke und / oder die Lage in der Konstruktion zurückzuführen ist. Der Einfluss der Randbedingungen wird im ungestörten Wandquerschnitt stärker gedämpft. Auch hier erreicht die relative Luftfeuchte maximal 70 %. Die anschließende Austrocknung ist auch in diesem Fall gewährleistet.



**Abbildung 6:** Ganglinien der Temperatur und der relativen Luftfeuchte in der Kleberebene im Bereich der Fensterlaibung

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in allen Wohnungen Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung installiert sind. Diese „normalisieren“ das Raumklima und tragen dazu bei, dass das „System Wohneinheit“ deutlich robuster wird als bei Lösungen ohne mechanische Lüftungseinrichtungen.

Für die hygrothermische Bewertung der konstruktiven Details im Rahmen der Planung sollte daher dennoch ein konservativer Ansatz für das Innenklima gewählt werden, um die Funktionstüchtigkeit der Konstruktion auch bei Ausfall oder bewusstem Abschalten der Lüftungsgeräte zu sichern.

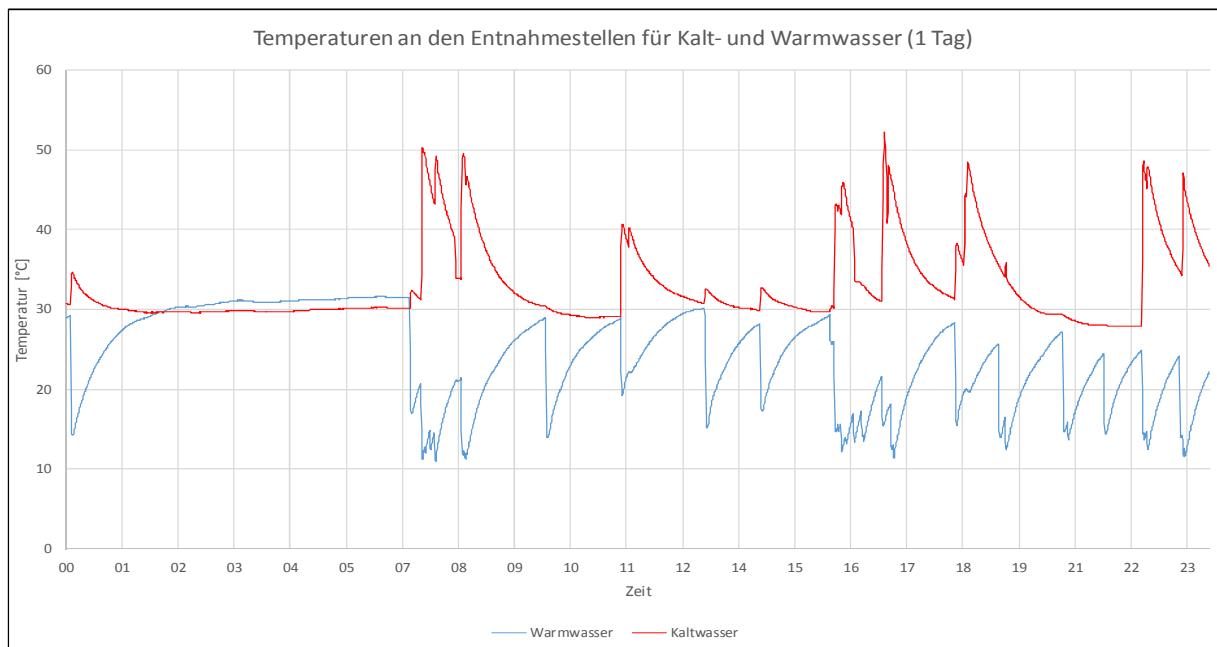
### 3.2 Analyse der gemessenen Verbrauchswerte

Bei Analyse der Verbrauchswerte ist im Hinblick auf die Gebäudehülle natürlich in erster Linie der Heizwärmebedarf als Bewertungskriterium heranzuziehen. Im betrachteten Gebäude beträgt der mittlere Heizwärmebedarf ca. 64 kWh/m<sup>2</sup>a. Laut Energieausweis wurde von einem Endenergiebedarf für die Raumheizung von 60 kWh/m<sup>2</sup>a ausgegangen. Der gemessene Energiebedarf für die Heizung liegt demnach geringfügig höher als der vorab berechnete Wert, was in der Regel auf höhere Raumtemperaturen zurückgeführt werden kann.

Die Temperaturganglinien an den Warm- und Kaltwasser-Entnahmestellen bilden eine wichtige Basis für eine umfassende Bedarfsanalyse auf Gebäude- oder

Quartiersebene. Durch eine Überlagerung der Messdaten aller Wohnungen entsteht beispielsweise ein Input für die Auslegung beziehungsweise Regelung der Versorgungstechnik.

Die hochaufgelösten Zeitintervalle lassen aber auch einige zusätzliche Detailanalysen zu. Bei der näheren Betrachtung der gemessenen Werte wird z.B. deutlich, dass häufig gleichzeitig Kalt- und Warmwasser entnommen wird. Dies geschieht in der Mehrzahl der Fälle sicher ungewollt, so dass auch hier durch gezielte Kommunikation mit den Mietern bzw. Eigentümern der Wohnungen ein gewisses Energiesparpotenzial erschlossen werden kann.

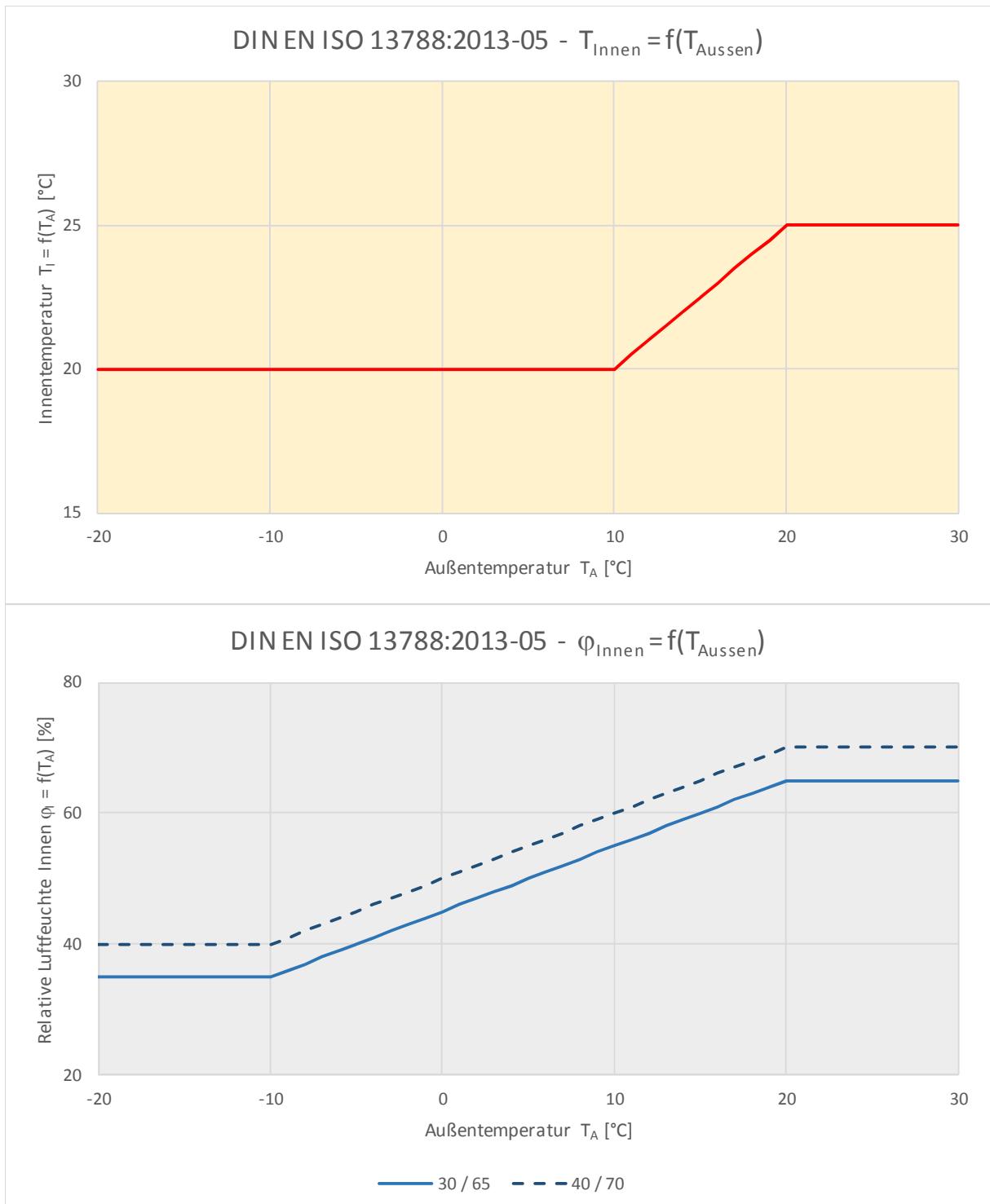


**Abbildung 7:** Anhand der Temperaturen an den Wasserzapfstellen wird der exakte zeitliche Anfall des Wasserbedarfes ermittelt

### 3.3 Raumklima (Heizungs- und Lüftungsverhalten)

Ein spezielles Thema – nicht nur im Zusammenhang mit Bemessungsverfahren und Energiebedarfsprognosen – ist zugleich eines, das dem größten Einfluss durch den Nutzer unterliegt: Das Raumklima.

Um zunächst zu einer überschläglichen Aussage zu gelangen, werden die Raumtemperaturen aller Räume einer Wohnung zu wohnungsbezogenen Stunden- bzw. Tagesmittelwerten zusammengefasst. Auf dieser Grundlage können die individuellen Vorlieben der Bewohner bezüglich des Raumklimas einer ersten Analyse unterzogen werden. In einem weiteren Schritt ist die Clusterung nach Raumtypen (Bad, Schlafräum, Wohnraum etc.) vorgesehen, um zu untersuchen, ob / in welchem Umfang differenzierte Raumtemperaturen angestrebt werden.



**Abbildung 8:** Ansatz zur Beschreibung des Innenklimas ( $T$ ,  $rH$ ) in Abhängigkeit von der Außentemperatur gemäß DIN

Ein wichtiger Punkt der Untersuchungen wird in der detaillierten Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Außenklima und Raumklima gesehen. Die dafür zur Verfügung stehende breite Datenbasis macht Hoffnung auf eine weitere Vervollständigung bereits verfügbarer Aussagen und vorangegangener Untersuchungen.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Das Projekt – insbesondere seine eingangs geschilderte Entwicklung – zeigt, dass auch schwierige Situationen durchaus bewältigt und entsprechend angepasste Ziele erfolgreich umgesetzt werden können. Dazu wollen wir an dieser Stelle ermutigen.

Die Messungen sind zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch nicht abgeschlossen und der überwiegende Teil der Auswertung steht noch bevor. Daher können zunächst nur ausgewählte Aussagen vorab präsentiert werden. Nach Abschluss der Messkampagne im Oktober 2017 erfolgt eine finale umfassende Darstellung und Veröffentlichung der Ergebnisse.

Bei der umfassenden Analyse der energetischen Performance der untersuchten Gebäude und des Nutzerverhaltens werden zeitlich hochauflöste Messdaten in einem vergleichsweise großen Umfang erfasst und verarbeitet. Die Nutzung der Daten soll sich daher nicht allein auf das vorgestellte Projekt beschränken.

Alle erfassten Daten werden daher für die weitere Verwendung im Rahmen der Begleitforschung entsprechend aufgearbeitet (anonymisiert und zusammengefasst), so dass nachfolgende Projekte und Untersuchungen die Möglichkeit haben, die Projektergebnisse zu nutzen.

# Der Holzbalkenkopf im innengedämmten Außenmauerwerk – Erkenntnisse aus der Bauforschung in historischen Gebäuden

Andrea Staar, BTU Cottbus-Senftenberg  
Torsten Bark, BTU Cottbus-Senftenberg  
Peter Strangfeld, BTU Cottbus-Senftenberg

## 1 Einleitung

In einer Vielzahl historischer Gebäude sind aus der Bauzeit stammende Holzbalkendecken erhalten. Eine konstruktive Schwachstelle dieser Bauweise ist der Auflagerbereich der im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfe. Durch einen Anstieg der Holzfeuchte kann ein Befall mit holzzerstörenden Pilzen und Insekten eintreten, der zu Schäden bis zum Verlust der Tragfähigkeit führt. Bei Sanierungsmaßnahmen werden auch Holzbalkendecken mit intakten Balkenköpfen vorgefunden. „Abbildung 1“ zeigt verschiedene Bereiche der freigelegten Holzbalkendecke eines um 1850 errichteten Gebäudes. Links ist ein nahezu vollständig zerstörter Balkenkopf zu sehen. Kondenswasser an einem gusseisernen Abflussrohr führte hier jahrzehntelang zu einer Durchfeuchtung des Holzes und verursachte diesen Schaden. Alle anderen Balkenköpfe dieses Sanitärraumes sind, ebenso wie die Balkenköpfe der restlichen Holzbalkendecke, vollkommen schadenfrei. Im Zuge der Gebäudesanierung wird das geschädigte Holz des Deckenbalkens entfernt und durch neues Holz ersetzt.



**Abbildung 1:** Auflagerbereich einer Holzbalkendecke (Baujahr um 1850)

Die energetische Sanierung einer erhaltenswerten Gebäudefassade erfordert die Applikation eines Innendämmsystems, was zu einer Veränderung des hygrothermischen Verhaltens der Konstruktion führt. In einem Verbundforschungsprojekt der Technischen Universität Dresden, des Fraunhofer Instituts Holzkirchen und der BTU Cottbus-Senftenberg ist die Problematik der im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfe untersucht worden [1]. Ein Untersuchungsschwerpunkt ist die Bauforschung an Balkenköpfen in historischen Gebäuden.

## 2 Messtechnische Untersuchungen in Referenzgebäuden

### 2.1 Referenzgebäude

Messtechnische Untersuchungen an Holzbalkenköpfen unter realen Nutzungs- und Klimarandbedingungen ermöglichen eine Bewertung des hygrothermischen Verhaltens nach der Applikation von Innendämmssystemen. Anhand von Langzeitmessungen werden der Einfluss der Baufeuchte aus Sanierungsmaßnahmen, das Trocknungsverhalten der Konstruktion und die Wirkung der Klimabedingungen nach Applikation einer Innendämmung bewertet. Für die Untersuchungen stehen Referenzgebäude zur Verfügung, die sich in der Ausführung und Ausrichtung der Fassade, dem gewählten Innendämmssystem und in ihrer Nutzung unterscheiden. In „Tabelle 1“ sind die konstruktiven Randbedingungen dieser historischen Gebäude zusammengefasst.

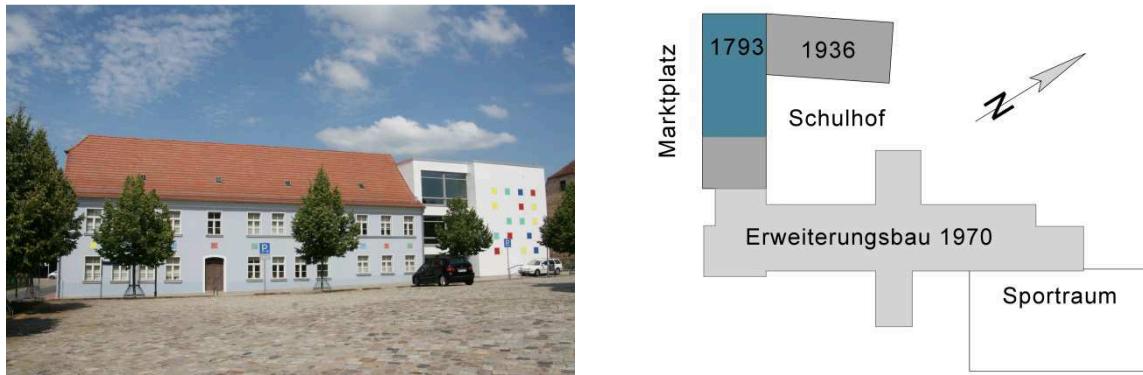
**Tabelle 1:** Übersicht der Referenzgebäude

Bezeichnung	Fassade	Innendämmung
Bürogebäude (Senftenberg, Brandenburg)	Ziegelsichtmauerwerk, Nordwestfassade	5 cm Kalziumsilikat
Herrenschießhaus (Nürnberg, Bayern)	Sandsteinmauerwerk, Südfassade	5 cm Kalziumsilikat
Schulgebäude (Drebkau, Brandenburg)	Vollziegelmauerwerk mit Putz, Südwest- und Nordostfassade	8 cm Perlite
Barockschloss (Drebkau, Brandenburg)	Fachwerkkonstruktion mit Vormauerung und Putz, Nordostfassade	8 cm Polystyrol-Extruderschaumstoff (XPS)

In allen Referenzgebäuden bleiben die historischen Holzbalkendecken bei der Sanierung erhalten. Abgesehen von der Fachwerkkonstruktion mit Vormauerung sind die Balkenköpfe an allen Referenzgebäuden im Bestand weitgehend schadenfrei. Die messtechnischen Untersuchungen dienen der langfristigen Dokumentation der Schadenfreiheit sowie dem Test verschiedener baukonstruktiver Ausführungsvarianten und des Einflusses gezielter Wärmeenergieeinträge [2]. Im Vergleich der Messungen in diesen Gebäuden wird der Einfluss aus dem unterschiedlichen Sanierungsumfang besonders deutlich. Während der Restaurierung historischer Bauwerke wird mit der Mauerwerkssanierung sowie bei Putz- und Estricharbeiten Feuchte eingetragen. Unter dem Einfluss dieser Baufeuchte kann die Holzfeuchte in Balkenköpfen ein kritisches Niveau über 20 M% erreichen. Die Messungen bestätigen jedoch auch, dass trotz der Applikation der Innendämmung eine Austrocknung der Konstruktion stattfindet. Feuchte, die in den Wintermonaten klimabedingt ansteigt, trocknet regelmäßig bis zum Sommer wieder ab. In allen Referenzgebäuden liegt die Holzfeuchte nach dem Austrocknungsprozess der Baufeuchte auf einem unkritischen Niveau, das eine Schadenfreiheit erwarten lässt.

## 2.2 Schulgebäude Drebkau

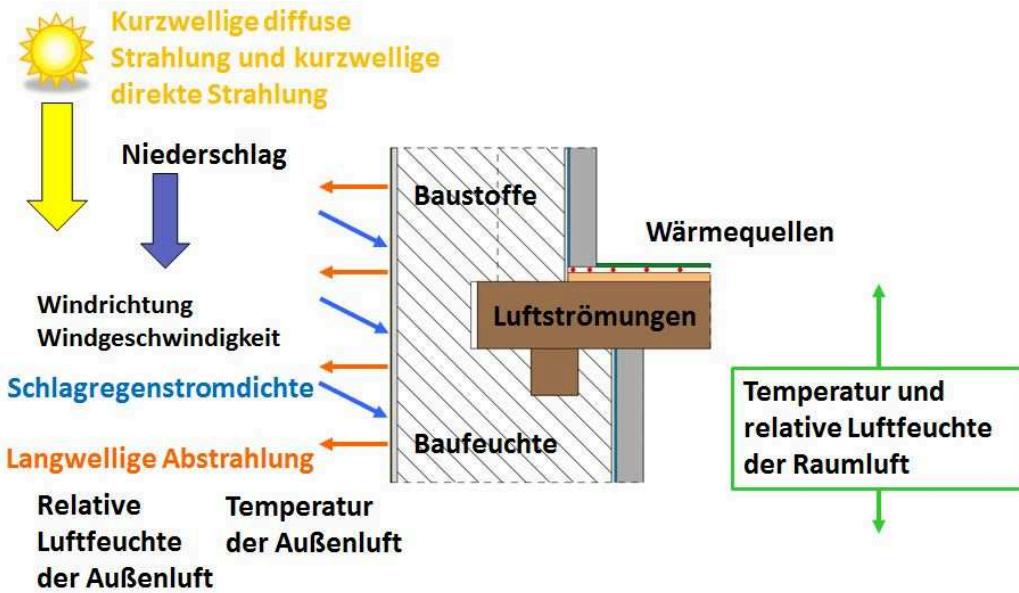
Im Abschnitt 3 dieses Beitrages werden Ergebnisse aus Untersuchungen im Schulgebäude Drebkau vorgestellt. „Abbildung 2“ zeigt die Südwestfassade und einen Übersichtsplan des Schulkomplexes. Das zweigeschossige historische Schulgebäude stammt aus dem Jahr 1793. Im Jahr 1936 folgen Anbauten, die 1970 um einen dreigeschossigen Erweiterungsbau ergänzt werden. Die dadurch entstandene Hofsituation hat eine Verschattung der Nordostfassade des historischen Schulgebäudes zur Folge. Auf der Südwestfassade des Gebäudes wirkt aufgrund der städtebaulichen Lage am Marktplatz uneingeschränkt der Einfluss der Sonnenstrahlung.



**Abbildung 2:** Schulgebäude Drebkau, Südwestfassade (links) / Übersichtsplan mit Angabe der Bauzeit (rechts)

Mit der Fertigstellung der energetischen Sanierung dieses historischen Schulgebäudes im Jahr 2011 beginnen die hygrothermischen Messungen an den Balkenköpfen. Die im Originalzustand erhaltene Holzbalkendecke befindet sich im 1793 errichteten Teil des Schulkomplexes und bildet die Geschossdecke zwischen dem Erd- und dem Obergeschoss. Genutzt werden die Räume auf der Südwestseite als Klassenzimmer und auf der Nordostseite als Flur. Die Innendämmung wird auf der Südwestseite in einem Klassenzimmer, ebenso wie im Flur auf der Nordostseite, durchgängig an der Außenwand über die Deckenebene geführt. Im anderen Klassenzimmer schließt sie ober- und unterseitig an die Geschossdecke an. Die Beheizung der Räume erfolgt über einen Klimaboden, der sich über der Dielung auf der Holzbalkendecke befindet. An einzelnen Balkenköpfen, die als Referenzbalken dienen, ist der Fußbodenaufbau ohne Klimaboden ausgeführt worden.

„Abbildung 3“ zeigt in einem Vertikalschnitt die Lage des Deckenbalkens in der Außenwandkonstruktion mit Einflussfaktoren auf das hygrothermische Verhalten [3]. Dazu gehören die Auflagerkonstruktion mit den Baustoffeigenschaften der verwendeten Materialien, das Außenklima mit den einzelnen Komponenten, das Innenklima und Randbedingungen wie Baufeuchte und Wärmeenergieeinträge. Bei der Erarbeitung eines feuchteschutztechnischen Nachweises mittels numerischer Simulationen sind diese Einflussfaktoren möglichst genau zu ermitteln und zu bewerten [4].



**Abbildung 3:** Vertikalschnitt des Balkenauflagers im Schulgebäude Drebkau mit Angabe der klimatischen und konstruktiven Randbedingungen

Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren im Stirnholz des Balkenkopfes und im Luftraum an der Stirnseite ermöglichen eine Bewertung des hygrothermischen Verhaltens. Eine Umrechnung der im Stirnholz gemessenen relativen Porenluftfeuchte in Holzfeuchte ist anhand der Sorptionsisotherme möglich, die aus dem Bohrmehl des Messpunktes im Labor ermittelt wird. An beiden Fassadenseiten werden die Außentemperatur und die relative Luftfeuchte der Außenluft aufgezeichnet. Strahlungssensoren messen den auf die Fassade auftreffenden Strahlungsanteil. Im Gebäude werden die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Raumluft gemessen.

### 3 Bewertung des hygrothermischen Verhaltens von Holzbalkenköpfen

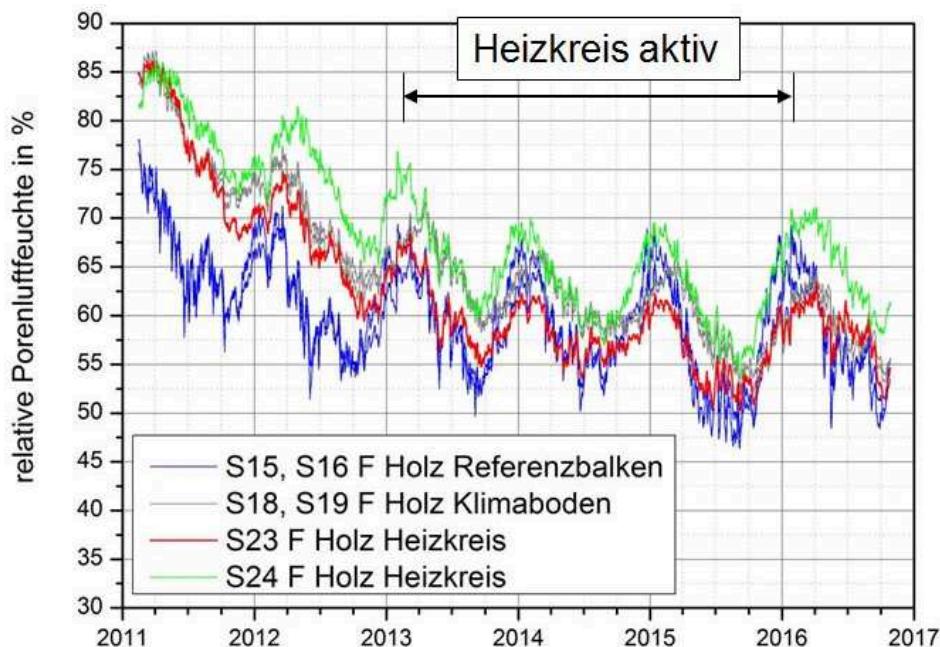
#### 3.1 Einfluss von Wärmeenergieeinträgen

In Außenwandkonstruktionen können Wärmeenergieeinträge durch verschiedene Installationen ermöglicht werden. Eine Variante ist die Aussparung der Innendämmung im Bereich der Scheuerleiste um an dieser Stelle die Vor- und Rücklaufleitungen der Heizung zu installieren. Ein positiver Einfluss der Beheizung auf die Feuchtentwicklung wird anhand der Messungen im Referenzgebäude am Standort Senftenberg nachgewiesen [5]. Eine weitere Variante ist der Wärmeenergieeintrag über Flächenheizungen an der Wand oder im Fußboden. „Abbildung 4“ zeigt die Installation der Rohrleitungen des Klimabodens in der Schule Drebkau vor der Verarbeitung des Estrichs. Wie in der Detailzeichnung in „Abbildung 3“ dargestellt, liegt hier an zwei Deckenbalken unterhalb der Innendämmung ein zusätzlicher Heizkreis, der eine Unterbrechung des Wärmeenergieeintrages unabhängig von der Regelung der Heizung ermöglicht.



**Abbildung 4:** Schulgebäude Drebkau – Klimaboden (Balkenköpfe S22-S24)

Unmittelbar nach dem Abschluss der Sanierungsarbeiten werden an den Balkenköpfen im Stirnholz Maximalwerte der relativen Porenluftfeuchte zwischen 80 % und 87 % gemessen. „Abbildung 5“ zeigt den Verlauf des Trocknungsprozesses an ausgewählten Balkenköpfen.



**Abbildung 5:** Schulgebäude Drebkau - Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe, Tagesmittelwerte 2011 - 2017

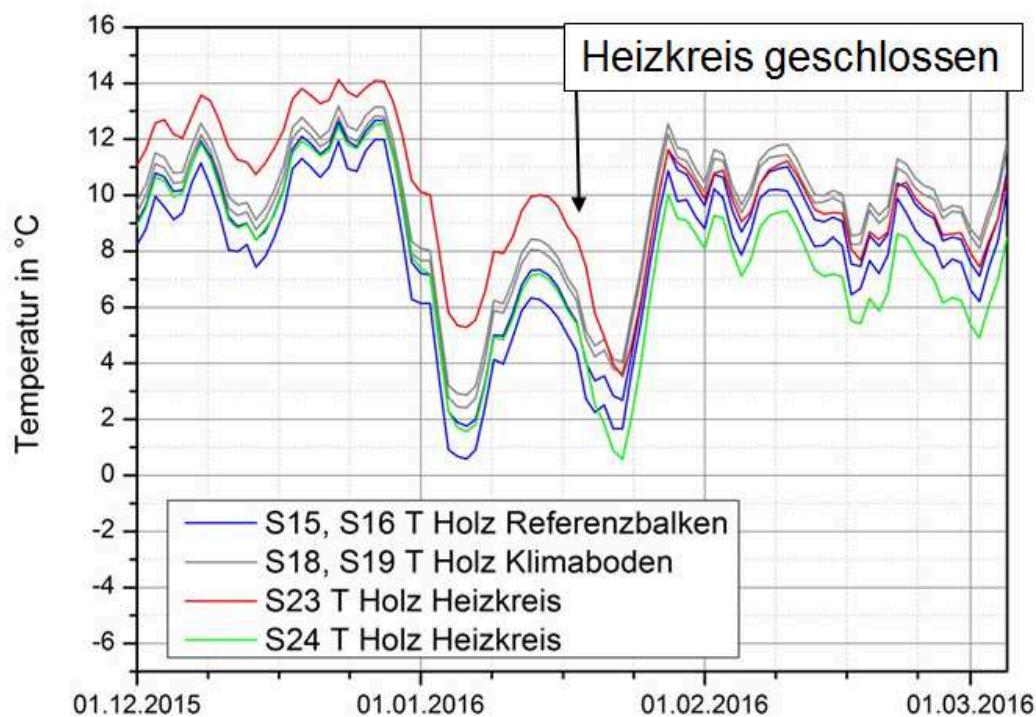
Dargestellt sind die Tagesmittelwerte der Messwerte an den Balkenköpfen mit üblicher Ausführung des Klimabodens (S18 und S19) und der Balkenköpfe mit zusätzlichem Heizkreis unter der Innendämmung (S23 und S24). Zum Vergleich enthält das Diagramm auch die Messreihen von zwei Balkenköpfen, die nicht dem Einfluss einer Beheizung unterliegen (S15 und S16). Bei dem Balken S24 handelt es sich um den Streichbalken in der Außenwanddecke der Südwest- und

Nordwestfassade. Die konstruktive Lage bewirkt, dass hier die höchste Feuchte auftritt.

Der Trocknungsprozess setzt nach der Inbetriebnahme an allen Balkenköpfen ein. Unter dem Einfluss des Wärmeeintrages über den zusätzlichen Heizkreis unter der Innendämmung, wird ab Januar 2013 der Trocknungsprozess an den Balkenköpfen S23 und S24 beschleunigt. Im Winter 2014 und 2015 nähert sich die Feuchte im Streichbalken (S24) dem Verlauf der anderen Balkenköpfe an, während der Balkenkopf S23 im Vergleich die geringste Feuchte zeigt. Nach dem Abschalten des Heizkreises im Januar 2016 hebt sich der Verlauf der Feuchte am Streichbalken wiederum deutlich von den anderen Balkenköpfen ab. Auch der jahreszeitbedingte Trocknungsprozess vollzieht sich langsamer.

Bei einer Außentemperatur von -5°C beträgt die Temperaturdifferenz zwischen dem Vorlauf und Rücklauf des Heizkreises etwa 3 K. Unter der Annahme, dass die Heizkreispumpe 24 Stunden in Betrieb ist, beträgt die über den Heizkreis in die Konstruktion eingetragene Wärmemenge ca. 2 kWh pro Tag.

Den Einfluss des Wärmeenergieeintrages auf die in den Balkenköpfen gemessenen Temperaturen verdeutlicht „Abbildung 6“. Dargestellt ist der Zeitraum unmittelbar vor und nach dem Schließen des Heizkreises.



**Abbildung 6:** Schulgebäude Drebkau - Verlauf der Temperatur im Stirnholz der Balkenköpfe, Tagesmittelwerte

Die Temperaturen an den Referenzbalken (blau) und an den Balkenköpfen mit angrenzendem Klimaboden (grau) bewegen sich in einem Bereich von 2 K. Bei geöffnetem Heizkreis wird der Balkenkopf S23 (rot) um 1,5 K erwärmt, während der Streichbalken die Werte der Referenzbalken erreicht. Nach dem Schließen

des Heizkreises liegt die Temperatur des Streichbalkens wieder deutlich unter der Temperatur in den Referenzbalken.

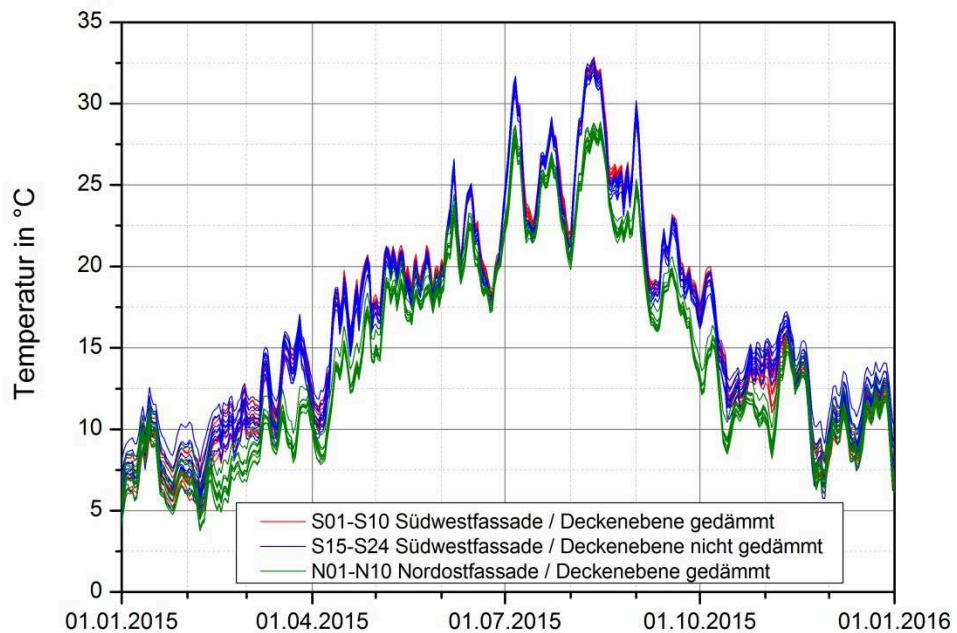
Die Austrocknung der Baufeuchte ist an der Balkenlage des Klassenzimmers im Jahr 2013 abgeschlossen. Unter Einfluss des Wärmeenergieeintrages über den zusätzlichen Heizkreis unterhalb der Innendämmung in den Jahren 2014 und 2015 gleicht sich die Feuchte im Streichbalken dem Verlauf der anderen Balkenköpfe an. Der Balkenkopf S23 hat innerhalb der betrachteten Holzbalkendecke die geringste Feuchte. Der Wiederanstieg der Feuchte nach dem Schließen des Heizkreises zeigt die positive Wirkung dieser technischen Lösung.

### **3.2 Einfluss der Sonnenstrahlung**

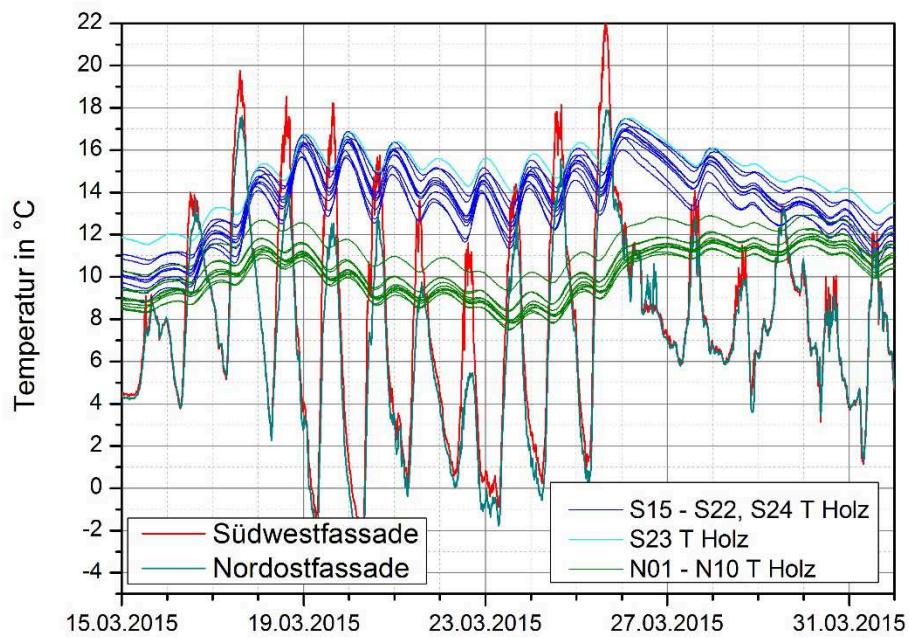
Ein möglichst rasches Austrocknen der Baufeuchte ist nach umfangreichen Sanierungsmaßnahmen die Voraussetzung für die Gewährleistung der Schadenfreiheit des Holzes der Balkenköpfe. Mit den Messungen an den beiden nach Südwesten und Nordosten gerichteten Fassaden des Schulgebäudes wird der positive Einfluss der Besonnung der Südwestfassade auf den Verlauf der Feuchte im Balkenkopf deutlich [6]. Die Baufeuchte trocknet hier wesentlich schneller ab. Der Strahlungseinfluss zeigt sich auch in den im Balkenkopf gemessenen Temperaturen in „Abbildung 7“. Dargestellt ist der Verlauf der Tagesmittelwerte des Jahres 2015 in allen drei Räumen des Schulgebäudes. Im Januar und Dezember 2015 ist der Strahlungseinfluss gering. Die Temperaturen liegen zu diesem Zeitpunkt in einem Wertebereich von 3 K. Im unteren Bereich verlaufen, grün dargestellt, die Temperaturen an den Balkenköpfen der Nordostfassade, da die Raumtemperatur aufgrund der Nutzung als Flur mit 18 °C unter der Raumtemperatur in den Klassenzimmern liegt. Unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung steigt die Temperatur in den Balkenköpfen der Südwestfassade im Februar und März 2015 deutlich an.

Signifikant sind die Unterschiede der nahe der jeweiligen Fassadenoberfläche gemessenen Außentemperaturen in „Abbildung 8“. An bewölkten Tagen sind die Temperaturen identisch. Unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung werden selbst in den Wintermonaten zwischen der Südwestfassade und der aufgrund des dreigeschossigen Schulerweiterungsbaus zusätzlich verschatteten Nordostfassade Temperaturunterschiede bis 7 K erreicht.

Anhand des Vergleichs der Temperaturen an den Balkenköpfen in den beiden Klassenzimmern auf der Südwestseite wird deutlich, dass hier der Einfluss aus den Varianten einer gedämmten und einer ungedämmten Deckenebene auf das hygrothermische Verhalten gering ist. Bei beiden Konstruktionsvarianten stellen sich im Stirnholz des Balkenkopfes vergleichbare Temperaturwerte ein.

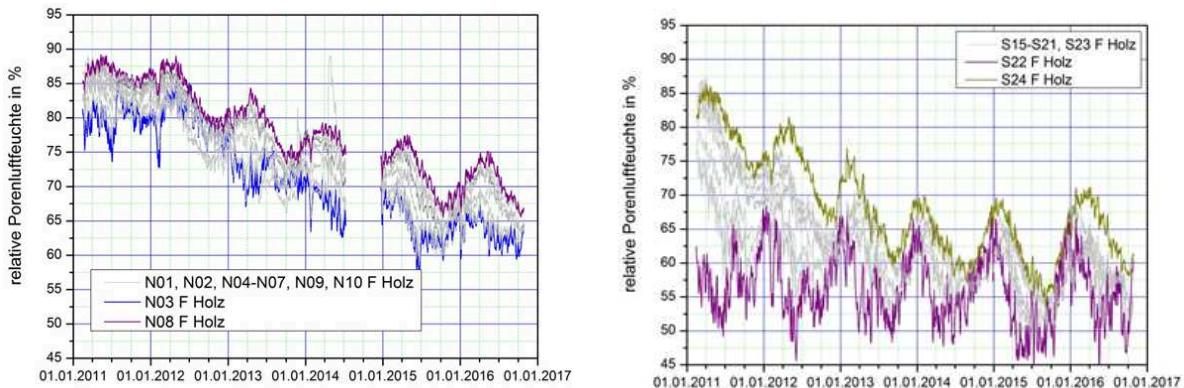


**Abbildung 7:** Schulgebäude Drebkau - Verlauf der im Stirnholz der Balkenköpfe gemessenen Temperatur, Tagesmittelwerte 2015



**Abbildung 8:** Schulgebäude Drebkau – Verlauf der Temperatur im Stirnholz der Balkenköpfe und an der Fassadenoberfläche

Der Strahlungseinfluss, resultierend aus der Himmelsausrichtung der Fassade und der städtebaulichen Lage, hat somit einen deutlich größeren Einfluss auf die Temperatur im Balkenkopf als die an diesem Referenzgebäude untersuchten konstruktiven Maßnahmen und Wärmeenergieeinträge. Gleichermaßen wird die im Balkenkopf gemessene relative Porenluftfeuchte beeinflusst. „Abbildung 9“ zeigt den Vergleich des Feuchteverlaufes in der Nordost- und der Südwestfassade. In der Nordostfassade setzt der Trocknungsprozess der Baufeuchte deutlich später ein und findet verzögert statt.



**Abbildung 9:** Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe an der Nordostfassade (Bild links) und der Südwestfassade (Bild rechts)

#### 4 Fazit

Die hygrothermischen Messungen in den Referenzgebäuden zeigen, dass die mit der Sanierung in das Bauwerk eingetragene Baufeuchte auch nach der Applikation eines Innendämmsystems wieder austrocknet. Beeinflusst wird das Trocknungsverhalten u.a. von der städtebaulichen Lage und der Himmelausrichtung der Fassade. An sonnenexponierten Fassaden vollzieht sich dieser Vorgang wesentlich schneller als an einer verschatteten Fassade oder der Nordseite des Gebäudes.

Die mit der Sanierungsmaßnahme eingetragene Baufeuchte kann einen Anstieg der Holzfeuchte in kritische Bereiche hervorrufen. Im vorgestellten Referenzgebäude erreichte die Holzfeuchte in einzelnen Balkenköpfen aufgrund der Sanierungsarbeiten Werte über 20 M%, obwohl die Balkenköpfe wegen der installierten Messtechnik besonders geschützt wurden. In der Praxis ist im Rahmen der Bauüberwachung dem Schutz der Balkenköpfe vor dem Feuchteeinfluss besondere Beachtung beizumessen.

Eine Schadensfreiheit wird an den untersuchten Referenzgebäuden auch ohne zusätzliche Wärmeenergieeinträge ermöglicht. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass ein gezielter Wärmeenergieeintrag das Trocknungsverhalten positiv beeinflussen kann.

#### 5 Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken: Bewertungsverfahren für Holzbalkenköpfe“ wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Programms „Energieoptimiertes Bauen (EnOB, Förderkennzeichen EKZ 0329663O). Die Betreuung erfolgt durch den Projektträger Jülich (PTJ), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

## Literatur

- [1] Grunewald, J.; Ruisinger, U.; Stöcker, E.; Staar, A.; Stopp, H.; Strangfeld, P.; Großkinsky, T.; Hofbauer, W.; Krus, M.; Bjarløv, S.P.; Odgaard, T.: Holzbalkenaufklager in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertungen und energetische Sanierung mittels Innendämmung, Beitrag im Mauerwerk Kalender, Verlag Ernst & Sohn, 2016
- [2] Strangfeld P., Staar A., Stopp H., Toepel T. 2012: Das hygrothermische Verhalten von Holzbalkenköpfen im innengedämmten Außenmauerwerk. In: Bausubstanz 2/2012, S.45–51 und 3/2012, S. 49–55, Fraunhofer IRB Verlag.
- [3] Staar, A.; Strangfeld, P.; Bark, T.: Numerische Simulation als Planungswerkzeug in der Bauphysik – Praxisbeispiel Holzbalkenkopf. GI Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, 2017, Jahrgang 138, 02/17, S. 122-131
- [4] WTA-Merkblatt 6-2-14/D. Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag, München 2014
- [5] Strangfeld P., Stopp H., Jurk K. 2007: Hygrothermie von Holzbalkenköpfen in wärmeschutztechnisch sanierten Außenwänden mit erhaltenswerten Fassaden, in: Europäischer Sanierungskalender 2007, Beuth Verlag Berlin
- [6] Anlauf, E.; Staar, A. 2014: Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Sandsteingebäudes mittels Innendämmung – Messergebnisse zum hygrothermischen Verhalten der Holzbalkenköpfe, in: BuFAS (Hrsg.): 25 Jahre Feuchte und Altbausanierung – Tagungsband der 25. Hanseatischen Sanierungstage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin, 2014, S. 85–100

# Vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Innendämm-systeme in der Alten Schäfflerei Kloster Benediktbeuern

Martin Krus, Stefan Bichlmair, Ralf Kilian, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

## 1 Einleitung

Die Untersuchungen finden am Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege im Kloster Benediktbeuern in der Alten Schäfflerei aus der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts („Abbildung 1“) statt. Das Zentrum setzt sich mit Aspekten zur Erhaltung des baukulturellen Erbes und der historischen Bausubstanz auseinander. Ein Schwerpunkt der Arbeit ist die energetische Verbesserung von Bestandsgebäuden unter Einbeziehung denkmalpflegerischer Belange. Durch das Zusammenführen von Tradition und Innovation werden neue praxisnahe Lösungen entwickelt, die am Baudenkmal und Altbaubestand langfristig funktionieren und die historische Substanz erhalten. Die Alte Schäfflerei wird dazu als Anschauungsobjekt im Sinne einer »Gläsernen Baustelle« im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte denkmalfachlich und unter energetischen Gesichtspunkten instandgesetzt.



**Abbildung 1:** Die Alte Schäfflerei im Kloster Benediktbeuern beherbergt das Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege (links). Im Obergeschoss der Alten Schäfflerei im Kloster Benediktbeuern werden innovative Materialien für die Innendämmung reversibel appliziert und mess-technisch untersucht (rechts).

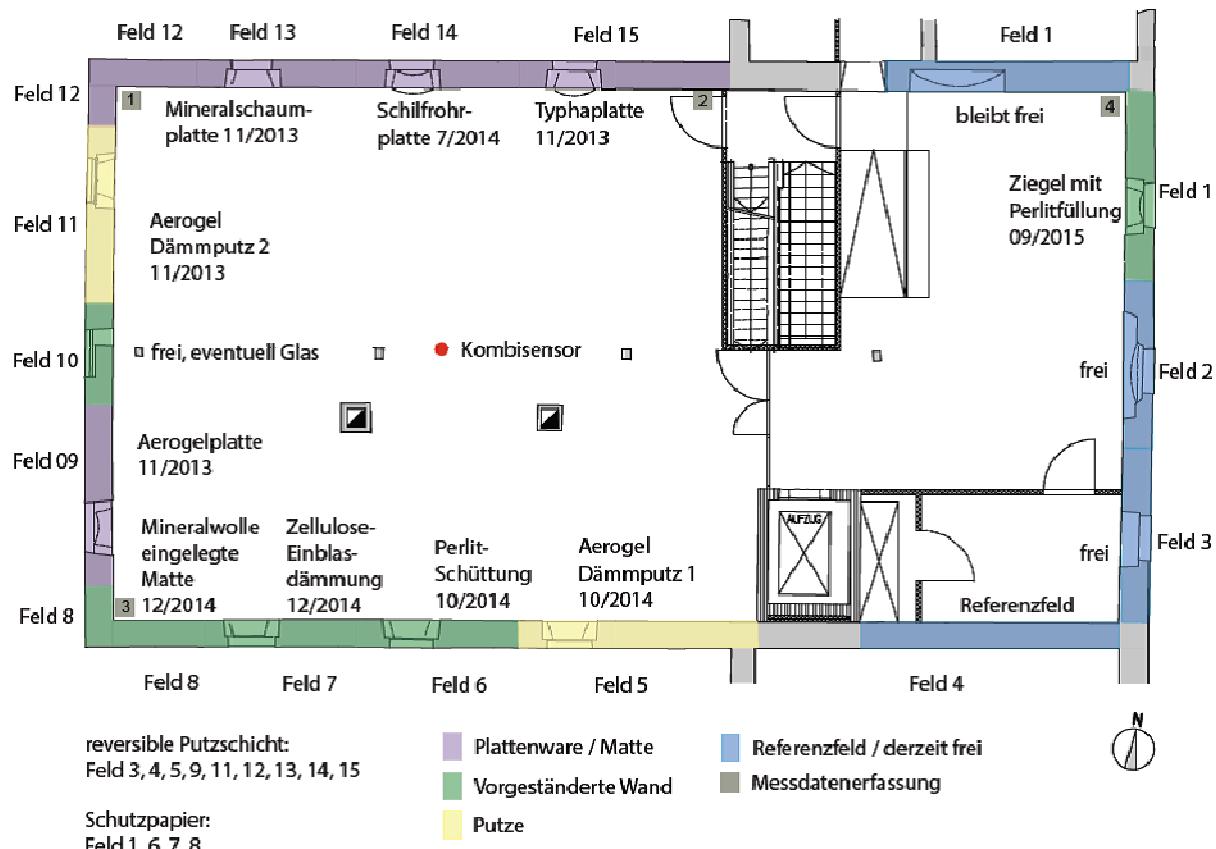
Bei dem Forschungsprojekt „Innendämmungen“ stehen innovative Materialien zur Innendämmung im Baubestand sowie die Weiterentwicklung vorhandener Produkte für die Denkmalpflege im Fokus. Hierbei ist vor allem die Frage der Reversibilität von großer Bedeutung. Innenraumoberflächen in historischen Gebäuden sind oft mit einer Vielzahl von übereinander liegenden Farbfassungen, also bunten und teilweise ornamentalen Anstrichen, versehen. Diese Schichten sind materielle Zeugnisse der Vergangenheit und geben Aufschluss über den

jeweiligen Zeitgeschmack. Beim Einbau von Dämmplatten werden diese Oberflächen üblicherweise mit Montageklebern verdeckt, die bei einem späteren Rückbau die historischen Befunde mit ablösen und zerstören.

Ziel des Projektes ist daher auch die Entwicklung von Systemen für eine rückbaubare Montage der Innendämmung, die bei einfacher Applikation mit möglichst geringem Verlust an wertvoller, historischer Bausubstanz auskommt. Dazu werden verschiedene Varianten betrachtet, von kaschierenden Zwischenschichten bis hin zu vorgeständerten Trockenbaukonstruktionen, die die originalen Oberflächen schützen sollen. Aber auch für den Bestandsbau mit regelmäßig wiederkehrenden Sanierungsintervallen bieten reversible Lösungen höhere Flexibilität in der Sanierung.

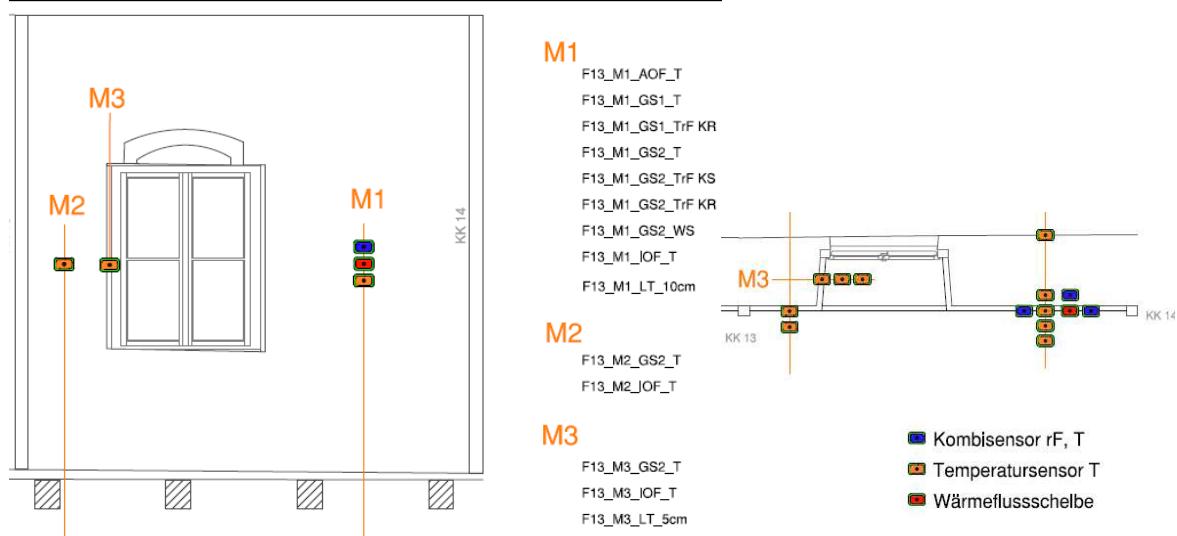
## 2. Auswahl der Dämmstoffe

Als Dämmstoffe werden neben mineralischen kapillaraktiven Platten-Dämmstoffen sowohl innovative, hochdämmende und dabei dünne Systeme (wie Aerogeldämmputz und Aerogelplatten), als auch Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen einbezogen [1]. Beide Kriterien sind für die Denkmalpflege relevant, da hier zum einen dünne, hoch effiziente Systeme gefragt sind, die das Erscheinungsbild der historischen Gebäude möglichst wenig beeinträchtigen, zum anderen aber auch Materialien, die auf einer eher inhaltlichen Ebene kompatibel mit den vorhandenen historischen Baumaterialien sind.



**Abbildung 2:** Grundriss des Obergeschoßes der Alten Schäfflerei mit den Flächen für die Varianten zu reversiblen Systemen für die Innendämmungen.

Vorgeständerte Systeme mit Mineralwolle, Zellulose-Einblasdämmung und Perlit-Schüttung sind ebenso vertreten wie eine vorgebaute Innenwand aus mit Perlit gefüllten Hohlziegeln. Grundsätzlich können die Systeme in diffusionsoffene und zum Teil kapillaraktive Dämmstoffe versus diffusionsdichte Konstruktionen und Materialien unterschieden werden. Die insgesamt zehn unterschiedlichen Dämmvarianten sind, wie in „Abbildung 2“ dargestellt, eingebaut und mit entsprechender Sensorik („Abbildung 3“) versehen worden. Jede der ca. 10 m<sup>2</sup> großen Wandflächen schließt dabei eine Fensteröffnung mit ein, um auch die Laibungs- und Anschlussproblematik zu untersuchen.



**Abbildung 3:** Typische installierte Messsensorik der Versuchsflächen. Ansicht von innen (links) und im Horizontalquerschnitt (rechts) am Beispiel von Feld 13.

### 3 Bewertung der Schlagregenbelastung und Auslegung der Innendämmung

Um das Risiko von Schäden an der historischen Bausubstanz der Alten Schäfflerei möglichst gering zu halten, werden zwei Strategien verfolgt. Zum einen werden die Systeme vor dem Einbau in hygrothermischen Simulationen auf kritische Randbedingungen hin getestet [3], wie z. B. die Wasseraufnahme des Außenputzes bei Schlagregenbelastung. Zum anderen stellt ein umfangreiches Monitoring der kritischen Stellen in der Konstruktion wie z.B. originale Wandoberflächen oder an den Balkenköpfen sicher, dass Schadensrisiken rechtzeitig erkannt werden und ggf. eingegriffen werden kann, bevor Schäden entstehen.

Mit Hilfe rechnerischer zweidimensionaler Untersuchungen werden für die Innendämmssysteme die Einsatzmöglichkeiten beurteilt. Dies dient auch der Eignungsprüfung der Dämmssysteme, um vor deren Einsatz in der Alten Schäfflerei Feuchteschäden von vorne herein auszuschließen. Voraussetzung für die Berechnungen ist die Kenntnis aller notwendigen hygrothermischen Kennwerte. Diese können zum Teil der WUFI® Materialdatenbank entnommen werden oder müssen experimentell bestimmt werden.

Als äußere Randbedingung für die Berechnungen dienen Klimadaten von der Wetterstation Benediktbeuern. Als Innenklima werden 20 °C und 50 % relative Feuchte zu Grunde gelegt, da der Raum später mit diesen klimatischen Randbedingungen betrieben werden soll. Die Systemaufbauten werden mit Westausrichtung berechnet, da dies die durch Schlagregen beanspruchte Fassade ist. In „Abbildung 4“ ist beispielhaft der Wandaufbau für das System mit Mineraldämmplatte dargestellt.

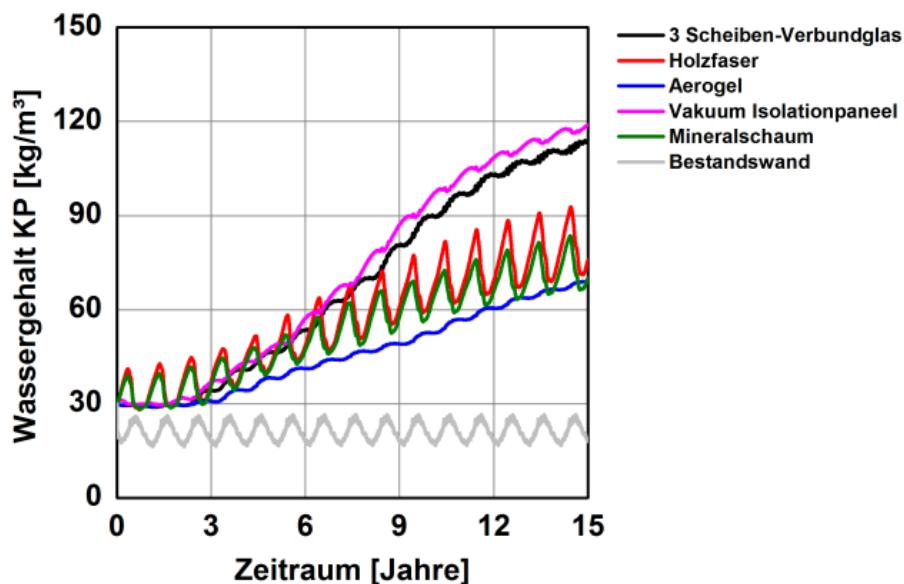


**Abbildung 4:** In WUFI®-2D implementierter Wandaufbau am Beispiel der Mineralschaumdämmung.

Weil für die Bestandswand die Materialkennwerte nicht bekannt waren, wurde im Vorfeld der rechnerischen Untersuchung am Außenputz der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) bestimmt. Da die Fassade mit verschiedenen Putzen ausgebessert wurde, ergibt sich eine große Schwankungsbreite des w-Wertes ( $1,8 - 7,7 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ ). Für die hygrothermische Simulation wurde ein Mittelwert von  $4,2 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$  als Ausgangssituation angenommen. Ebenfalls konnte mittels Wärimestrom- und Temperaturmessung der U-Wert des Aufbaus rechnerisch bestimmt werden. Er liegt bei ca.  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

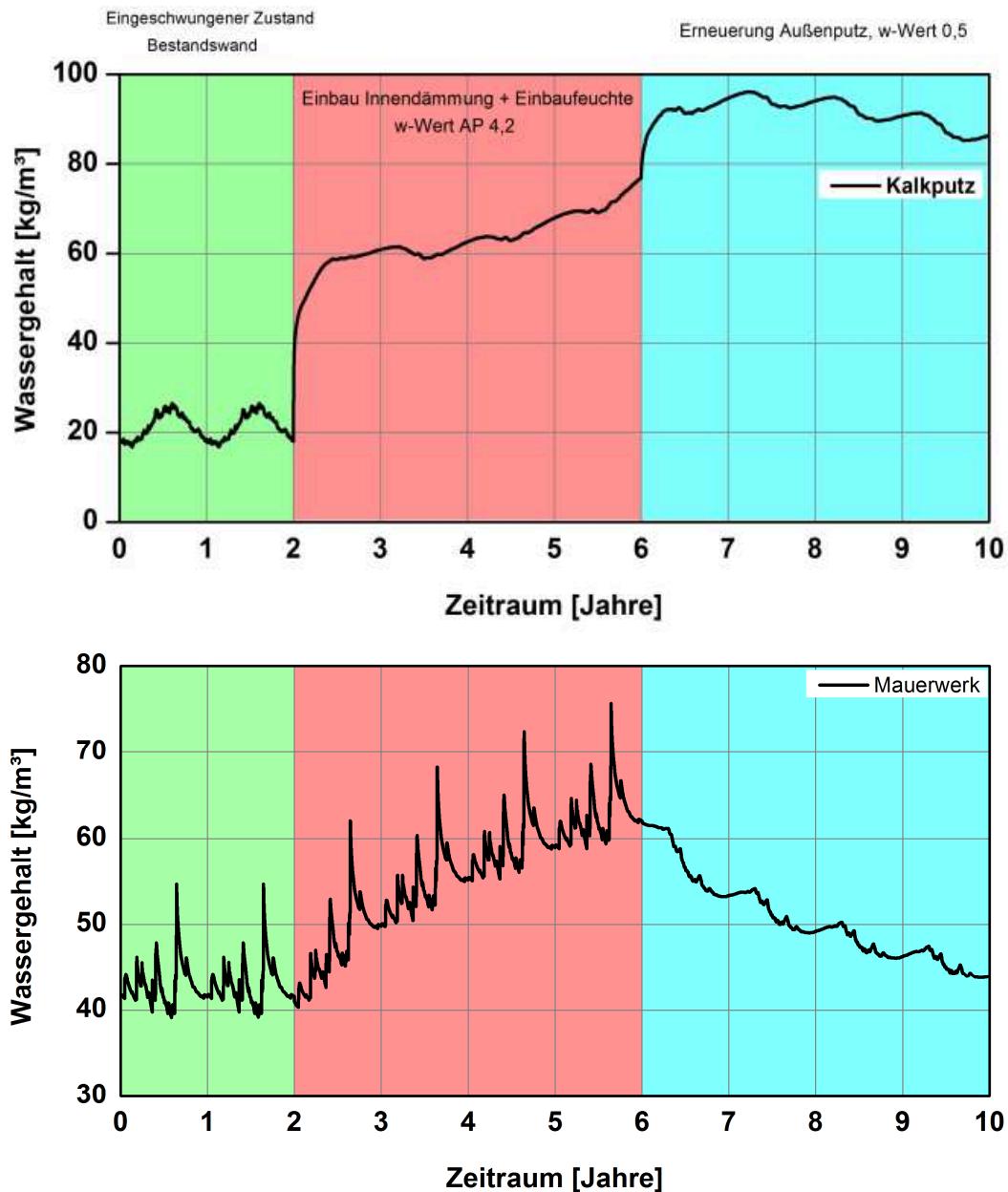
Ausgehend von einem Anfangsfeuchtegehalt in den einzelnen Materialien entsprechend einer Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte nimmt der Wassergehalt im Kalkputz der Bestandswand bei allen für die Berechnungen ausgewählten Varianten („Abbildung 5“) stetig zu. Dies betrifft vor allem die diffusionsdichten Systeme (Vakuumisolationspaneele und dämmende Verglasung), weshalb diese beiden Systeme in dieser Form auch nicht umgesetzt werden. Vergleicht man die Ergebnisse der Bestandswand ohne Innendämmung mit den anderen Dämmsystemen, fällt auf, dass die Bestandswand trotz Schlagregenbelastung einen geringen Wassergehalt aufweist. Der Anstieg des Wassergehaltes ist damit begründbar, dass durch den hohen Wasseraufnahmekoeffizienten des Außenputzes Regenwasser aufgenommen und durch das Mauerwerk kapillar weiter geleitet wird. Im Gegensatz zur Situation ohne Innendämmung findet aber aufgrund der zusätzlichen Diffusionswiderstände der Innendämmssysteme und der Temperaturabsenkung der Bestandinnenoberfläche kaum noch eine Austrocknung nach innen statt. Um

Schäden an der Oberfläche des Kalkputzes bzw. an den historischen Farben zu vermeiden, muss der w-Wert des Außenputzes verringert werden. Möglichkeiten zur Senkung der Wasseraufnahme wären die Hydrophobierung, eine stärker wasserabweisende Beschichtung oder das Aufbringen eines neuen Putzsystems. Es wurden deshalb rechnerische Untersuchungen durchgeführt, um so den erforderlichen w-Wert der Außenbeschichtung zu ermitteln. Hierbei ergab sich, dass ab einem w-Wert von  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$  keine Auffeuchtung mehr im Putz stattfindet. Bei den beiden diffusionsdichten Systemen (3-Scheiben-Verbundglas & VIP) konnte sogar eine leichte Abnahme des Wassergehaltes verzeichnet werden.



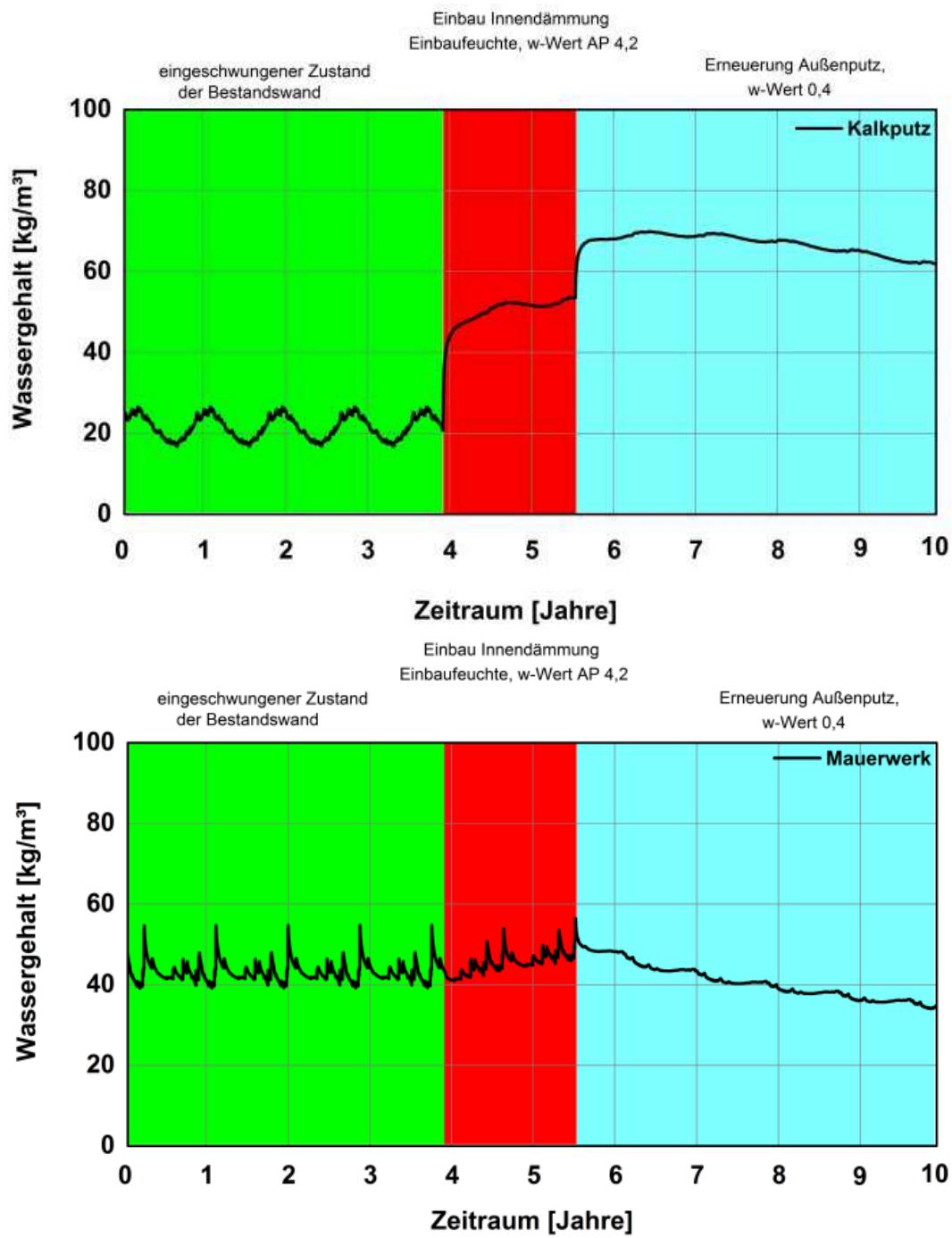
**Abbildung 5:** Für unterschiedliche Innendämmsysteme berechneter Verlauf der Wassergehalte im Kalkputz der Westseite.

Zum Zeitpunkt des Einbaus der Innendämmsysteme war es aus baupraktischen Gründen noch nicht möglich, die Außenfassade entsprechend zu sanieren. Diese Maßnahme war aber zu einem späteren noch nicht genau bestimmmbaren Zeitpunkt geplant. Um abzuschätzen, ob der Einbau der Innendämmungen trotzdem ohne nennenswertes Schadensrisiko erfolgen kann, wurde als worst-case-Szenario die Situation einer Fassadensanierung erst vier Jahre nach Anbringung der Dämmsysteme berechnet. Dabei wurde auch der Einfluss der Einbaufeuchte mitberücksichtigt. In „Abbildung 6“ ist der Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz in den verschiedenen Phasen (eingeschwungener Zustand Bestand, Einbau der Innendämmung mit Einbaufeuchte sowie nach Absenkung der Wasseraufnahme des Außenputzes) dargestellt.



**Abbildung 6:** Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz (oben) und im Mauerwerk (unten) in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 4 Jahren.

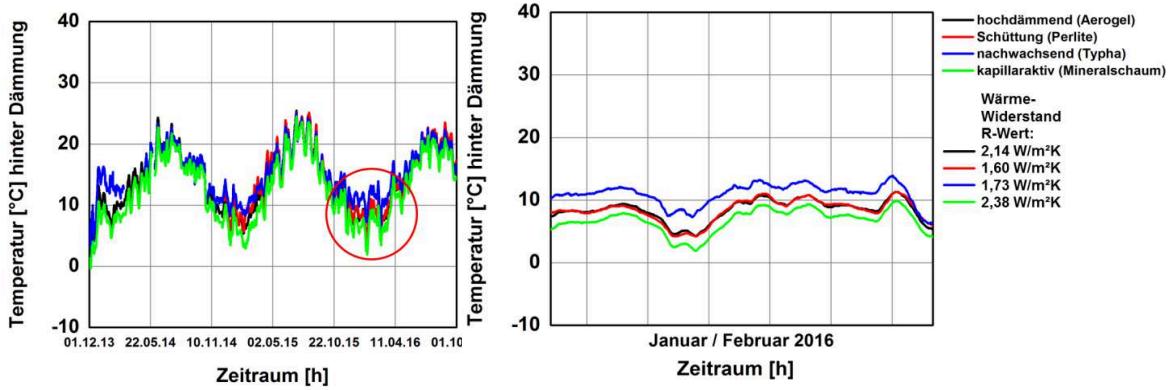
Es ist deutlich zu erkennen, dass es nach dem Einbau der Innendämmung zu einer starken Auffeuchtung im Kalkputz kommt. Würde nach 4 Jahren eine Verringerung der Wasseraufnahme (w-Wert) des Außenputzes erfolgen, dauert der Anstieg auch noch etwa ein Jahr nach der Fassadensanierung an, bis eine langsame Austrocknung im innenseitigen Kalkputz stattfindet. Der dabei maximal auftretende Sättigungsgrad liegt dabei aber unterhalb von 50 %. Die Fassade wurde inzwischen, etwa 1,5 Jahre nach der Applikation der Innendämmung, saniert und mit einem wasserabweisenden Anstrich versehen. Dadurch ergibt sich, gemäß den mit diesem Zeitpunkt durchgeführten Berechnungen, eine deutlich günstigere Situation (siehe „Abbildung 7“).



**Abbildung 7:** Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz (oben) und im Mauerwerk (unten) in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 1,5 Jahren.

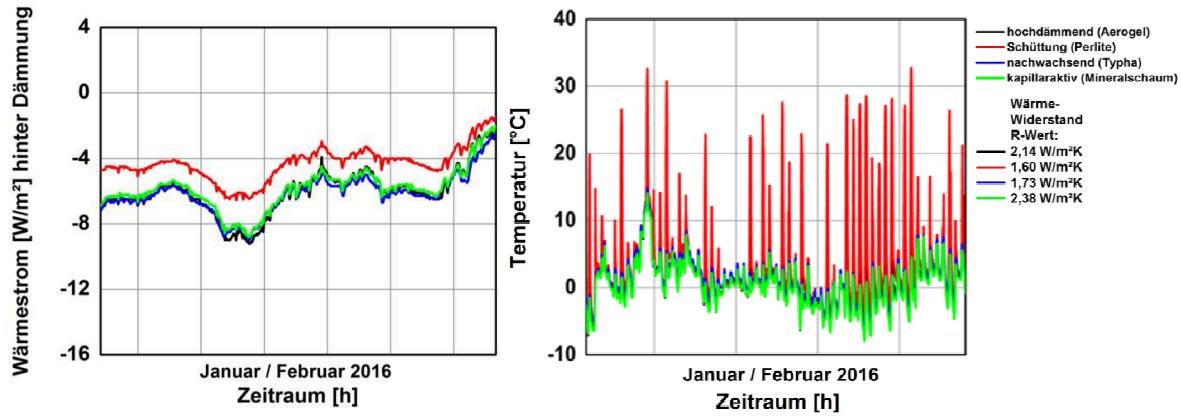
#### 4 Vergleichende Darstellung der Messergebnisse

In Abbildung 8 sind die Temperaturverläufe hinter der Dämmung dargestellt. Dazu sind von den Kategorien hochdämmender Dämmstoff, vorgeständerte Trockenbauweise und nachwachsender sowie kapillaraktiver Dämmstoff ein typischer Vertreter ausgewählt worden (Aerogeldämmung, Perlit-Schüttung und Typhaboard sowie Mineraldämmplatte).



**Abbildung 8:** Gemessene Temperaturverläufe hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Kaschierung mit dünnem Japanpapier) für den gesamten Messzeitraum (links). Der rote Kreis zeigt den im rechten Bild dargestellten Zeitraum. Mit aufgelistet sind die rechnerischen Werte für den Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Dämmsysteme. Mit angegeben ist der jeweilige Wärmedurchlasswiderstandswert des Dämmsystems, der sich vor allem aus der Wärmeleitfähigkeit und Dicke des Dämmstoffs ergibt. Erwartungsgemäß ergeben sich in der Sommerperiode nur geringe Unterschiede im Gegensatz zum Winterzeitraum mit Beheizung. Vergleicht man die Lage der Kurven mit den Wärmedurchlasswiderständen, ergibt sich die erwartete Reihung. Mit höherem R-Wert ergibt sich eine niedrigere Temperatur hinter der Dämmung.

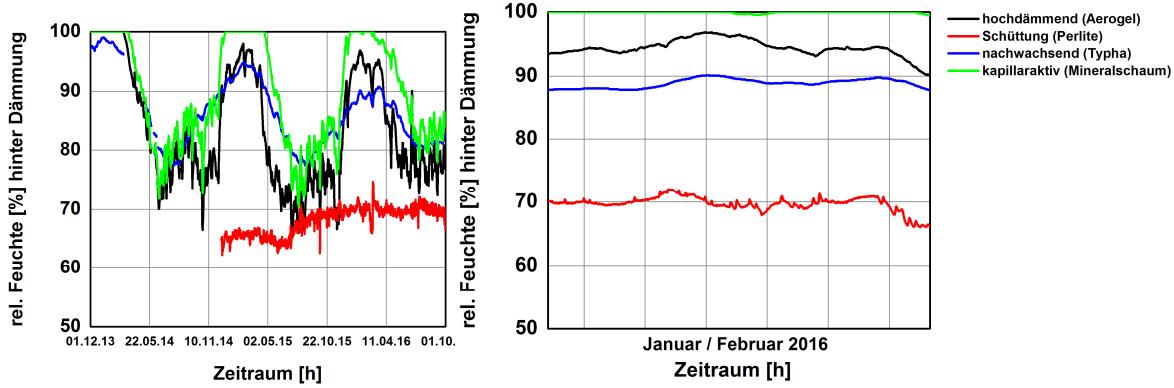
„Abbildung 9“ links zeigt den Verlauf des gemessenen Wärmestroms hinter der Dämmung für den Winterzeitraum Januar und Februar 2016. Obwohl die Perlit-Schüttung den geringsten Wärmedurchlasswiderstand aufweist, ergibt sich bei der damit gedämmten Wand ein deutlich geringerer Wärmeverlust. Betrachtet man den Verlauf der gemessenen Außenoberflächentemperatur („Abbildung 8“ rechts) wird dieses Verhalten erklärbar. Da die mit Perlit gedämmte Fassade eine Südausrichtung aufweist, ergeben sich durch die solare Einstrahlung immer wieder recht hohe Außenoberflächentemperaturen, was sich auch im Verlauf der Tagesmittel der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenoberfläche widerspiegelt.



**Abbildung 9:** Links: Gemessener Wärmestrom hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung). Rechts: Verlauf der gemessenen Außenoberflächentemperatur für eine Auswahl

von Dämmstoffen jeder Kategorie. Mit aufgelistet sind die rechnerischen Werte für den Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Dämmsysteme.

Die untersuchten Dämmsysteme weisen aufgrund ihrer materialtechnischen Eigenschaften und der Art des Einbaus ein deutlich unterschiedliches Feuchteverhalten auf. „Abbildung 10“ zeigt links den Verlauf der relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung für die Gesamtzeit und rechts für den Zeitraum Januar/Februar 2016. Man erkennt sofort die niedrige Luftfeuchte bei der Perlit-Dämmung (Messbeginn Nov. 2014); die darin begründet ist, dass es sich zum einen um eine Trockenbauweise handelt und zum anderen, dass eine Dampfbremse eingesetzt wurde. Aufgrund der Einbaufeuchte starten die Messkurven der Aerogeldämmung und der Mineralddämmung bei 100 %. Nur bei der Typhadämmung ergeben sich etwas niedrigere Werte. In der Sommerperiode findet bei allen drei Systemen eine merkliche Austrocknung statt, sodass zeitweise die 80 % unterschritten werden. Auffällig ist dabei der deutlich ruhigere Verlauf der Typhadämmung, welcher in dem Feuchtepuffervermögen dieses Materials begründet sein dürfte. Im Anschluss an diese Trocknungsperiode findet bei allen Systemen (außer der Perltdämmung) eine deutliche Auffeuchtung statt. Bei der Mineralddämmplatte ergibt sich ein besonders schneller Anstieg bis auf 100 % rel. Feuchte. Ab Ende Dezember bleibt hier die gemessene Luftfeuchte bei 100 %. Dies ist typisch für ein kapillaraktives diffusionsoffenes Dämmsystem, das darauf beruht, dass das im Material auftretende Tauwasser kapillar zurückgeleitet wird, um eine kontinuierliche Auffeuchtung zu vermeiden. Bei der Aerogel- und der Typhadämmung ergeben sich in diesem Zeitraum Luftfeuchten zwischen 93 % und 97 % (Aerogel) und 93 % und 95 % (Typha). Auch hier zeigen sich die geringeren zeitlichen Schwankungen bei der Typhadämmung.



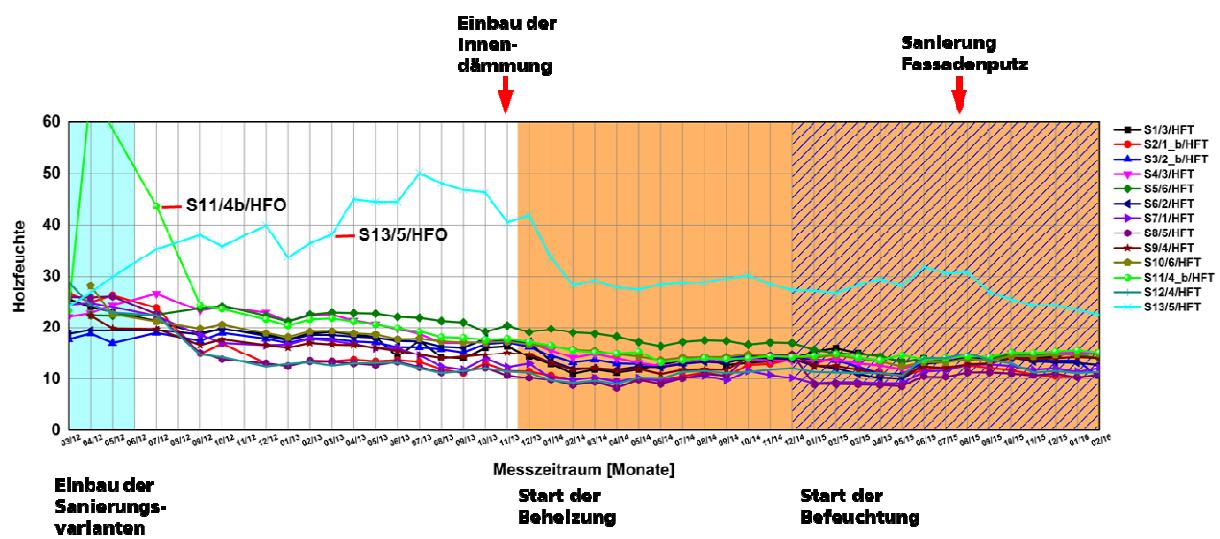
**Abbildung 10:** Gemessene relative Feuchten hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung) für den gesamten Messzeitraum (links) und für den Zeitraum Januar und Februar 2016 (rechts).

## 5 Einfluss auf den Feuchtehaushalt der Holzbalkenköpfe

Die in Benediktbeuern durchgeföhrten Untersuchungen zum Feuchtehaushalt von Holzbalkenköpfen des Bodenaufbaus des Obergeschosses der Alten Schäfflerei sind Inhalt eines anderen Forschungs-Projektes. Die dabei gewonnenen

Ergebnisse werden ausführlich in dem noch erscheinenden, dazu gehörenden Abschlussbericht beschrieben. Zur allgemeinen Information wird im Folgenden eine Kurzzusammenfassung der Ergebnisse gegeben.

Bei der Öffnung der Holzbalkendecke der Alten Schäfflerei des Klosters Benediktbeuern zeigte sich, dass fast alle Holzbalkenköpfe massiv von holzzerstörenden Pilzen befallen waren. Als Resultat mussten nahezu alle Holzbalkenköpfe grundlegend saniert werden. Dies bot die Möglichkeit, an einem Gebäude unterschiedliche Sanierungstechniken zu erproben und messtechnisch zu begleiten. Es wurden insgesamt 24 zerstörte Holzbalkenköpfe saniert. Die durchgeführten Sanierungsvarianten unterscheiden sich dabei vor allem in der Art der Dämmung im Auflager und in den Hohlräumen um den Balkenkopf. Beispielsweise zeigt „Abbildung 11“ für den Gesamtzeitraum die Zeitverläufe der an den Balkenköpfen aller Sanierungsvarianten im Kern gemessenen Holzfeuchten auf der Südseite.



**Abbildung 11:** Zeitverläufe der an den Balkenköpfen aller Sanierungsvarianten im Kern gemessenen Holzfeuchten auf der Südseite.

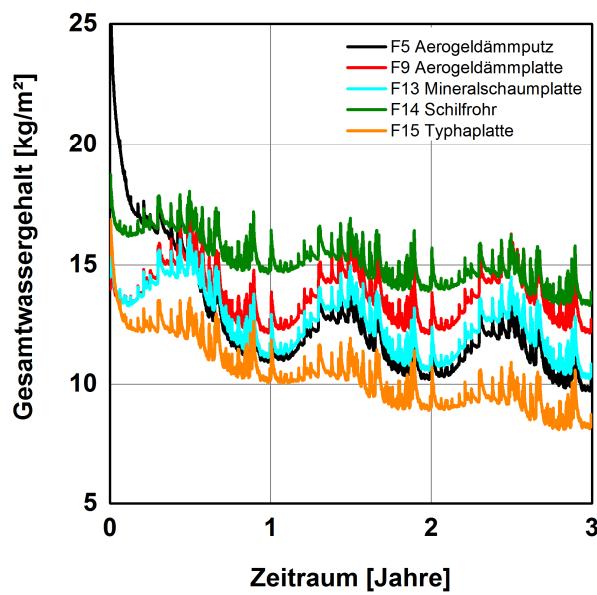
Dabei zeigte sich, dass mit Beginn der Einbaurbeiten für die Innendämmungen im Oktober / November 2013 ein leichter Feuchteanstieg in den Holzbalkenköpfen der Südseite zu beobachten war, obwohl zu diesem Zeitraum auf der Südwand noch keine Innendämmungen verbaut wurden. Dies zeigt, dass hier als Hauptbefeuhtungsmechanismus die durch Einbau der Innendämmungen auf der Nordseite erhöhte Raumluftfeuchte ursächlich war. Folgerichtig macht sich zwar der Einbau des Aerogelputzes auf der Südseite im Oktober 2014 als Feuchteanstieg bemerkbar, nicht aber die Installation der Trockenbauvarianten mit Zellulose-Einblasdämmung und Perlitschüttung im Dezember 2014. Nahezu alle Balkenköpfe auf der Südseite trocknen bis auf die erwähnten kurzfristigen Feuchteerhöhungen kontinuierlich mit der Zeit ab und erreichen Holzfeuchten von deutlich unter 20 M.-%. Sie liegen damit erwartungsgemäß etwas niedriger als auf der Nordseite, aber auch hier ergeben sich niedrige unkritische Holzfeuchten.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse im Großen und Ganzen mit den Erwartungen überein, der Einfluss der unterschiedlichen Auflagervarianten und seitlichen

Dämmungen des Balkenkopfes ist aber deutlich geringer ausgeprägt als erwartet. Es zeigen sich nur in den ersten ein bis zwei Jahren merkliche Unterschiede, die aber vor allem in unterschiedlichen Anfangsfeuchten begründet sind. Danach ergeben sich bis auf geringe zeitliche Verschiebungen kaum noch Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten. Der vorab erwartete deutliche Einfluss der Art der Balkenkopfsanierung scheint nur in sehr geringem Umfang gegeben zu sein und im Vergleich zum Einfluss der Inhomogenitäten des Wandaufbaus von eher untergeordneter Bedeutung. Bei allen Balkenköpfen ergeben sich längerfristig trotz der mit Raumluftfeuchten von 50 % r. F. relativ hohen Feuchtelast auch mit Einbau der Innendämmung völlig unkritische Wassergehalte. Dies zeigt aber auch, dass die hygrothermische Situation am Balkenkopf unkritischer ist als erwartet, sofern als wesentliche Voraussetzung ein ausreichender Regenschutz von außen gegeben ist und keine relevante Hinterströmung mit warmfeuchter Innenluft auftritt. Die immer wieder vorgefundene massiven Schäden an Balkenköpfen dürften somit in den meisten Fällen durch unzureichenden Regenschutz der Fassade sowie in temporären lokalen massiven Feuchtebelastungen durch Havarien verursacht sein, wie z. B. undichte Dächer oder Regenwasserableitungen.

## 6 Vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Innendämmssysteme

Die Bewertung der Systeme erfolgt nach Gesichtspunkten des Wärmeschutzes, des Energieaufwandes für die Herstellung, nach Eigenschaften bezüglich des Feuchteschutzes, der Denkmalverträglichkeit sowie des Umweltschutzes. Außerdem gehen der Applikationsaufwand und die Kosten mit ein sowie die mechanischen Eigenschaften. Eine wesentliche feuchtetechnische Fragestellung ist der Umgang mit der Einbaufeuchte, also letztendlich die Trocknungszeit. Da dies, auch aufgrund der unterschiedlichen Einbauzeiten und der unterschiedlichen Orientierung, nicht ausreichend genau messtechnisch bestimmt werden kann, erfolgt deren Bestimmung über rechnerische Untersuchungen („Abbildung 12“).



**Abbildung 12:** Berechnete Verläufe des Gesamtwassergehalts nach Applikation der mit Einbaufeuchte belasteten Dämmssysteme (aus [6]).

Die Felder mit dem größten Eintrag an freiem Wasser sind Feld 5 und Feld 11 mit den beiden Dämmputzen. Die beiden Aerogeldämmputze weisen nahezu identische Materialkennwerte auf, weshalb nur Feld 5 dargestellt wird. Die Einbaufeuchte wird durch die Putzmaschine bestimmt und liegt hier bei etwa 300 bis 400 Liter/m<sup>3</sup>, das entspricht zwischen 15 und 20 Liter/m<sup>2</sup>. Der Dämmputz hat eine geringe Dampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu=4$ ) und trocknet somit auch schnell nach innen aus. Der Feuchteverlauf entspricht nach wenigen Monaten bereits dem Verlauf der Mineraldämmplatte auf Feld 13. Außer Feld 5 und Feld 11 liegt allen anderen Systemen lediglich der Feuchteintrag durch den Klebemörtel als Baufeuchte vor. Feld 14 trocknet zu Beginn am langsamsten. Dies ist das einzige der mit der Wand verklebten Systeme bei dem eine Dampfbremse eingebaut wurde, in diesem Fall mit einem  $s_d$ -Wert von 2 m. Feld 9 trocknet zwar anfangs rasch, bleibt nach ca. drei Jahren aber feuchter als die übrigen Systeme. Im vierten Winter hat Schilfrohr bereits einen niedrigeren Feuchtegehalt als der Aufbau mit Aerogelplatten. Die Typhaplatte auf Feld 15 weist einen hohen Weiterverteilungskoeffizienten auf, und trocknet dadurch rasch ab.

Die Aerogelputze weisen vor allem große Vorteile hinsichtlich der energetischen und der denkmalpflegerischen Aspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht sind der materialgleiche Einbau in den Laibungen und die einfache Anwendung bei komplizierten Geometrien, wie z.B. ein abgesetzter Rundbogensturz, vorteilhaft. Auch in Bezug auf die bautechnischen Aspekte ergibt sich eine gute Beurteilung. Aufgrund der hohen Einbaufeuchte sowie der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der Hydrophobizität ergibt sich eine ungünstigere Beurteilung hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte.

Die Aerogelplatten weisen ebenfalls vor allem große Vorteile hinsichtlich der energetischen und der denkmalpflegerischen Aspekte auf. Auch dies bezieht sich auf die Möglichkeit des materialgleichen Einbaus in den Laibungen und die einfache Anwendung bei komplizierten Geometrien. Positiv stellt sich die Bewertung des Schimmelpilzrisikos auf der Bestandsoberfläche dar. Aufgrund der Einbaufeuchte sind einige feuchtschutztechnische Aspekte nur als mäßig einzustufen. Insgesamt können die feuchtetechnischen Aspekte jedoch als gut bewertet werden.

Ähnliche bautechnische und denkmalpflegerische Vorteile ergeben sich bei den kapillaraktiven Mineraldämmplatten. Auch hier ist der materialgleiche Einbau in den Laibungen und bei komplizierten Geometrien zwar zum Teil aufwändig aber problemlos möglich. Aufgrund der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der Kapillaraktivität ergibt sich eine mäßige Beurteilung hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte. Aus energetischer und feuchttechnischer Sicht ist das reale Dämmverhalten durch die Feuchtaufnahme etwas ungünstiger im Vergleich zum (trockenen) Laborwert.

Die Wandkonstruktion mit Dampfbremse und Schilfrohrmatten (Feld 14) hat vor allem große Vorteile hinsichtlich der ökologischen Aspekte. Bei den Feuchteschutzaspekten schneidet der Dämmstoff aufgrund der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der dadurch erforderlichen Dampfbremse jedoch relativ ungünstig ab. Ebenso ist ein energetisch hohes Niveau nur mit großen

Dämmstoffdicken zu erreichen. Bautechnisch ist der Einbau mit der gewählten Konstruktion besonders aufwändig, da zur Erzielung des gewünschten Wärmedurchlasswiderstandes ein zweischichtiger Aufbau mit Rahmenkonstruktion erforderlich wurde. Hinzu kommt auch hier die Problematik bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz. Aus denkmalpflegerischer Sicht wird das bereits seit Jahrhunderten verwendete Material als günstig bewertet.

Das Typhaboard aus nachwachsendem Rohstoff zeigt vor allem Vorteile hinsichtlich der ökologischen Aspekte. Aus bautechnischer Sicht ist der materialgleiche Einbau in den Laibungen und auch bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, problemlos möglich. Aufgrund der leicht dampfbremsenden Wirkung in Verbindung mit der Kapillaraktivität ergibt sich eine günstige Beurteilung hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte. Die energetische Bewertung fällt etwas ungünstiger aus, da für ein hohes Dämmniveau vergleichsweise große Materialdicken erforderlich sind. Aus denkmalpflegerischer Sicht wird der nachwachsende Rohstoff günstig bewertet.

Die vorgesetzte Wand aus mit Perlit gefülltem Dämmziegel, mit Ausgleichsschüttung ebenfalls mit Perlit zwischen originaler Wand und Ziegelmauer, hat vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte, jedoch wurden hier nicht alle Aspekte bewertet. Der Systemaufbau mit trockener Schüttung zwischen Ziegelwand und originaler Oberfläche stellt sich positiv dar. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, aufwändig. Hier und bei den Laibungen wurde deshalb auf einen Dämmputz ausgewichen, der sinnvoller Weise materialgleich mit Dämmstoff aus Perlit bzw. gleichem Putzfabrikat wie der Innenputz hergestellt wurde.

Die Trockenbauwand mit Perlit weist vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z.B. ein abgesetzter Rundbogensturz, aufwändig. Hier und bei den Laibungen wurde deshalb auf einen Dämmputz ausgewichen, der sinnvoller Weise materialgleich mit Dämmstoff aus Perlit hergestellt wurde. Die Verwendung einer Dampfbremse kann fehleranfällig sein, insbesondere die Anschlüsse zur Bestandswand, und wird deshalb als ungünstig eingestuft.

## Literatur

- [1] Stefan Bichlmair, Martin Krus und Ralf Kilian: Eine neue Methode zur VIP-Innendämmung im Bereich der Denkmalpflege. Konzept – Aufbau – Erste Ergebnisse. 2. Internationaler Innendämmkongress, 12.-13. April 2013, Dresden, Internationales Kongress Center.
- [2] Theuerkorn, W.; Fritsch, A.; Mach, M.; Krus, M; Großkinsky, Th.; Fitz, C. Theuerkorn, D. Knodt, H. Walter, U.: Neuer Baustoff für umweltfreundliche und bautechnische Sanierung in der Denkmalpflege. DBU-Bericht (Förderkennzeichen AZ 27918)

- [3] M. Krus, O. Silberhorn, R. Kilian, M. Kratzmeier: Innovative Innendämmung im Denkmalschutz. Energetische Sanierung des Augsburger Landesamtes für Finanzen - Simulation und messtechnische Begleitung. – BAUSUBSTANZ 4 (2013); H. 1, S. 24 – 33; ISSN 2190-4278.
- [4] Krus, M.; Sedlbauer, K.: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Internationaler Innendämmkongress, 20.-21. Mai 2011. Dresden Tagungsband S. 53-64. ISBN 3-940117-07-06.
- [5] Krus, M.; Theuerkorn, W.; Großkinsky, Th.; Georgiev, G.: Neuer, tragfähiger Dämmstoff aus Rohrkolben (Typha) zur Fachwerksanierung und Innendämmung. Bauphysiktage Kaiserslautern, 27. – 28. November 2013, Tagungsband S. 115-117. ISBN 978-3-943995-41-1.
- [6] Pfundstein, B.: Untersuchungen zum hygrothermischen Verhalten von reversiblen Innendämmungen im Denkmalschutz. Diplomarbeit, Studiengang Holzbau und Ausbau, Fachhochschule Rosenheim, 2015.

# Das bauphysikalische Forschungs- und Entwicklungslabor am Zentrum für Bauforschung der TU Dresden

John Grunewald, Frank Meißner; TU Dresden – Institut für Bauklimatik

---

## 1 Einleitung

Die Methoden zur experimentellen Bestimmung der hygrothermischen Materialparameter und -funktionen von Baustoffen werden nunmehr seit 20 Jahren am bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des Instituts für Bauklimatik angewendet und weiterentwickelt. Dadurch hat sich das Institut ein Alleinstellungsmerkmal geschaffen, welches es ermöglicht, einerseits neue Produktentwicklungen aus der Baustoffindustrie zu prüfen und zu bewerten und andererseits das Wissen über die neuen Produkte in ingenieurtechnische Forschungsdienstleistungen einfließen zu lassen.

Durch eine Entscheidung des Senats der TU Dresden und die Bewilligung der Baumaßnahmen zur Sanierung des Gebäudekomplexes „von Mieses Bau“ stehen am Standort Georg-Schumann-Str. 7 moderne Laborräume und Prüfeinrichtungen an einem zentralen Ort des Campus zur Verfügung. Die Verwaltung der Laborräume und Prüfhallen mit den angeschlossenen Werkstätten wurde von dem im Januar 2016 gegründeten Zentrum für Bauforschung (ZfBau) übernommen, welches einen organisatorischen Rahmen für gemeinschaftlich genutzte räumliche, materielle und personelle Ressourcen bildet.

Das Institut für Bauklimatik ist mit dem bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor in das Zentrum für Bauforschung integriert. Das Labor ist eng in die laufenden Forschungsprojekte des Institutes eingebunden. Schwerpunktthemen sind der neu entstehende Forschungsprüfstand für multifunktionale aktive Fassadensysteme mit Raumankopplung, die Entwicklung von Technologien zur Energiespeicherung für die oberflächennahe Geothermie bzw. Agrothermie und das klassische Thema Innendämmung bei Holzbalkendecken in Bestandsgebäuden, wofür ein spezieller Prüfstand entwickelt und in Betrieb genommen wurde.

Unser langjähriger Laborleiter Dr. Rudolf Plagge (†10.03.2016) hat einen maßgeblichen Anteil an dieser Entwicklung. Viele der neu entwickelten Prüfverfahren und Labortests und die daraus gewonnenen Erkenntnisse gehen auf sein Wirken zurück. Die Ergebnisse seiner Arbeit sind heute für uns von unschätzbarem Wert.

## 2 Motivation

Der Ressourcen- und Umweltschutz ist eine der Kernaufgaben unserer Zeit. Die Verbrennung fossiler Energieträger zur Energieerzeugung muss in Zukunft stark

zurück gefahren werden. Als Alternativen stehen der Ausbau der regenerativen Energieversorgung, die effizientere Bereitstellung von Energie sowie die Energieeinsparung in vielen Bereichen der Gesellschaft zur Verfügung.

Für den Bausektor besitzt die Einsparung von Energie im Gebäudebestand die größte Bedeutung. Dabei muss die Sanierung im Bestand durch die Prinzipien der Nachhaltigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit begleitet werden. Das bedeutet, dass die Wärmedämmung neben dem Einbau effizienter Versorgungstechnik, weiterhin eine der wichtigsten Maßnahmen in Sanierungskonzepten darstellt.

Die nachträgliche Dämmung der Außenwände auf der Innenseite bietet dabei die Möglichkeit, die Maßnahmen in der Breite der Bestandsgebäude umzusetzen. Auch Gebäude, bei denen keine Außendämmung möglich ist, können nachhaltig und schadenfrei bei gleichzeitiger Sicherung des thermischen Wohnkomforts saniert werden. Weiterhin besitzt die nachträgliche Dämmung von Dächern oder Kellerdecken ein hohes Energieeinsparpotential.

Für die Hersteller von Bau- und Dämmstoffen ist die energetische Sanierung von Gebäuden ein wichtiger Markt. Um an diesem Markt teilhaben und bestehen zu können, entwickeln die Hersteller fortwährend neue Systeme, die immer effizienter und vielfältiger aber damit auch komplexer und zum Teil schadensanfälliger werden. Vertreter der Baustoffindustrie suchen daher vermehrt den Kontakt zu wissenschaftlichen Einrichtungen, um die Produkte im Labor prüfen zu lassen und die Entwicklung gemeinsam voranzutreiben. Ingenieuren und Planern fällt es dabei zunehmend schwer, die Wirkmechanismen immer neuer Systeme einzuschätzen und diese korrekt einzusetzen. Die fachgerechte Planung stellt deshalb zukünftig immer höhere Anforderungen sowohl an die Planer als auch an die Planungswerzeuge.

Sehr große Dämmstärken können ohne eingehende Feuchteschutzplanung das Schadensrisiko erhöhen. Für eine Vielzahl von Anschlussdetails müssen konstruktive Lösungen gefunden werden, die das veränderte bauklimatische Verhalten der Bestandskonstruktion adäquat berücksichtigen und die Schadensrisiken bezüglich Brand, Frost, Schimmel und Salzen sowie hygrothermischer Beanspruchung begrenzen. Die fachlich einwandfreie Bewertung der kritischen, baukonstruktiven Details ist der Schlüssel zur nachhaltig schadenfreien und wirtschaftlich sinnvollen Umsetzung der energieeffizienten Sanierung im Bestand.

Bei unzureichender Kenntnis der Schadensmechanismen werden in der Planung allgemein größere Sicherheiten vorgesehen, was zu Lasten der Wirtschaftlichkeit geht. In der Konsequenz **behindert** die aus Unkenntnis der Schadensmechanismen übermäßige planerische Sicherheit häufig **die Umsetzung der energetischen Sanierung in der Breite**.

Bauschäden stehen den Nachhaltigkeitszielen unserer Gesellschaft diametral entgegen. Sie verursachen über den unmittelbaren ökonomischen Schaden hinaus einen allgemeinen Vertrauensverlust in die energetische Sanierung an sich

(oft wird beispielsweise Wärmedämmung mit Schimmel gleichgesetzt). Für die Beseitigung der Bauschäden und Herstellung des geforderten Zustandes werden zusätzliche Ressourcen aufgewendet. Schadenfreiheit ist eine Grundvoraussetzung, um die Einsparung von Energie und Ressourcen im Bausektor erfolgreich umzusetzen. In Gebäuden sind die folgenden Schadensmechanismen im Bereich der Baukonstruktion relevant:

- Inneres Kondensat und ggf. ablaufendes Tauwasser
- Zerstörung von Holz durch Pilzbefall
- Quellvorgänge und Entfestigung von Holzwerkstoffen
- Korrosion von Stahlbauteilen in Beton und anderen mineralischen Baustoffen
- Risse durch Quell- und Schwindvorgänge, bzw. spannungs- oder bewegungsbedingte Schäden an Konstruktionen durch starke Feuchtewechsel
- Kondensat oder Schimmel an Rauminnenoberflächen bzw. Algen auf der Fassade
- Schäden durch Salzkristallisation
- Frostschäden infolge von Eisbildung

Für die hygrothermische Analyse stehen bewährte Simulationswerkzeuge zur Verfügung (DELPHIN [1], WUFI [2]), die den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der hygrothermischen Prozesse in Baukonstruktionen abbilden. Aufbauend auf dieser Basis können die oben aufgezeigten Schadensmechanismen eingeschätzt und bewertet werden und Lösungen erarbeitet werden, die das Schadensrisiko ohne zu großzügige Sicherheitsreserven minimieren.

### 3 Eingesetzte Methoden

Im bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor werden folgende hygrothermische Kennwerte und Basisdaten ermittelt:

- Trockenraumdichte, offene Porosität
- Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
- Wasserdampfdiffusion( Drycup, Wetcup)
- Feuchtespeichereigenschaften (überhygrokopischer, hygrokopischer Bereich, Desorptionsisotherme, Adsorptionsisotherme)
- Wasseraufnahme und Verdunstung
- Flüssigwassertransport

Nach Abschluss der Messung werden die einzelnen Kennwerte in ein institutseigenes Berechnungsschema überführt und die Materialfunktionen für das Simulationsprogramm DELPHIN generiert. Diese werden danach anhand der Wasseraufnahme- und Verdunstungsmessungen überprüft und gegebenenfalls erneut angepasst.

#### 3.1 Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmekapazität [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] repräsentiert das Wärmespeichervermögen eines Baustoffes und zeigt an, wie viel Wärmeenergie pro kg Baustoff und Grad Kelvin gespeichert werden können. Die Wärmeleitfähigkeit liefert die Energiemenge, die durch eine definierte Materialdicke bei einem definierten Temperaturgradienten transportiert werden kann [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]. Zur Messung kommt am Institut für

Bauklimatik die Heat-Pulse-Technologie zum Einsatz. Dazu wird ein definierter Wärmepuls über einen elektrischen Heizwiderstand in einer Sonde erzeugt und in den Probenkörper geleitet. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität basiert auf periodischen Temperaturmessungen als Funktion der Zeit einer 10 mm bis 15 mm mächtigen Materialprobe.

### **3.2 Wasserdampfdiffusionswiderstand (nach DIN EN ISO 12572 [3])**

Bei geringer relativer Luftfeuchte erfolgt der Feuchtetransport dominant durch die Wasserdampfdiffusion. Mit Hilfe des sogenannten „Dry-Cup-Verfahrens“ kann diese gemessen werden. Bei höheren Luftfeuchten bis etwa 95 % treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf. Dieser zunehmende Flüssigtransport bewirkt einen exponentiellen Anstieg der Diffusion und kann über das „Wet-Cup-Verfahren“ unter isothermen Bedingungen gemessen werden.

Die Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes findet am Institut für Bauklimatik ausschließlich mit eigenentwickelten Messgefäß statt. Sie erlauben die Messung des gleichen Probenkörpers im Dry- und Wetcup, ohne das die Fixierung der Probe geändert werden muss. Bei speziellen Messungen mit kleinen Dampfdruckgradienten (z.B. bei Folien) ist auch eine Messung der Luftfeuchtigkeit im Cupgefäß möglich.

### **3.3 Bestimmung der überhygrokopischen Feuchtespeicherung (Wasserretention nach DIN EN ISO 11 247 [4])**

Nach der kapillaren Wassersättigung der Materialproben werden diese auf keramischen Platten platziert und über angelegte Kapillardrücke entwässert. Abhängig vom angelegten Kapillarpotential unterscheidet man die Messverfahren in *Hängende Wassersäule (0-30 hPa)*, *Unterdruckapparatur (30-750 hPa)* und *Druckplattenapparatur (30-15000 hPa)*. Zur Messung der Wasserretention werden die zuvor gesättigten Proben stufenweise über steigende Kapillarpotentiale entwässert. Nach dem Erhalt eines kapillaren Gleichgewichtes bei einer Druckstufe wird der Feuchtegehalt der Materialprobe gravimetrisch bestimmt. Die Proben werden anschließend wieder auf der Keramik platziert und eine nächst höhere Druckstufe angelegt. Zunehmende Kapillarpotentiale führen zu abnehmenden Wassergehalten und liefern eine Desorptionscharakteristik. Umgekehrt führen abnehmende Kapillardrücke zu steigenden Wassergehalten und liefern eine Adsorptionscharakteristik der Feuchtespeicherung im überhygrokopischen Bereich.

### **3.4 Hygrische Sorptionsisotherme (nach DIN EN ISO 12 571 [5]) – Bestimmung der hygrokopischen Feuchtespeicherung**

Nach dem Abschluss der Desorption bei einer Druckstufe von 11.000 bis 15.000 hPa entsprechend 11 bis 15 bar Kapillardruck werden die Proben in einem Exsikkator mit  $K_2SO_4$  bei 96.7% relativer Feuchte gelagert und vorkonditioniert. Nach dem Erhalt statischer Gleichgewichtsbedingungen wird der Wassergehalt gravimetrisch bestimmt und die Proben werden in einer weiteren Luftfeuchtestufe konditioniert.

Durch eine stufenweise Konditionierung mit jeweils niedrigeren relativen Luftfeuchten werden die Proben sukzessive entwässert. Abnehmende Luftfeuchten mit immer trockener werdenden Proben liefern die Desorptionscharakteristik, steigende Luftfeuchten mit wachsenden Feuchtegehalten liefern eine Adsorptionscharakteristik. Eine Differenzierung in eine Ad- und Desorption ist besonders für die Beurteilung der Feuchte puffernden Eigenschaften relevant. Die Wasserretention und die hygrische Sorptionsisotherme zusammen liefern die gesamte Feuchtespeicherfunktion. Deren Verknüpfung erfolgt über die sogenannte Kelvingleichung unter Verwendung von Gleichung 1 nach:

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_w R_v T}} \quad (1)$$

wobei  $R_v$  der allgemeinen Gaskonstanten [ $\text{Wskg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] und  $T$  der Temperatur in [K] entspricht. Die Parameter  $\sigma$  und  $\omega$  korrespondieren mit der Oberflächenspannung [ $\text{Pam}^{-1}$ ] und dem Kontaktwinkel an der Grenzfläche zwischen Wasser und Festphase.  $\rho_w$  ist die Dichte des Wassers [ $\text{kgm}^{-3}$ ] und  $\varphi$  die relative Luftfeuchte [-]. Die Konvertierung von relativer Luftfeuchte in Kapillardruck erfolgt über den Porenradius mit:

$$\psi = \frac{c}{r} \quad \text{mit} \quad (2)$$

$$c = 2\sigma \cos \omega / g \rho_w$$

wobei  $\psi$  dem Kapillardruck [Pa] entspricht.  $c$  ist äquivalent der kapillaren Steighöhe,  $r$  multipliziert mit der Konstanten von  $\sim 9.81 \cdot 10^{-3}$  repräsentiert einen Äquivalentporenradius [cm] und  $g$  ist die Gravitation [ $\text{ms}^{-2}$ ].

### 3.5 Wasseraufnahmekoeffizient (nach DIN EN ISO 15148 [6])

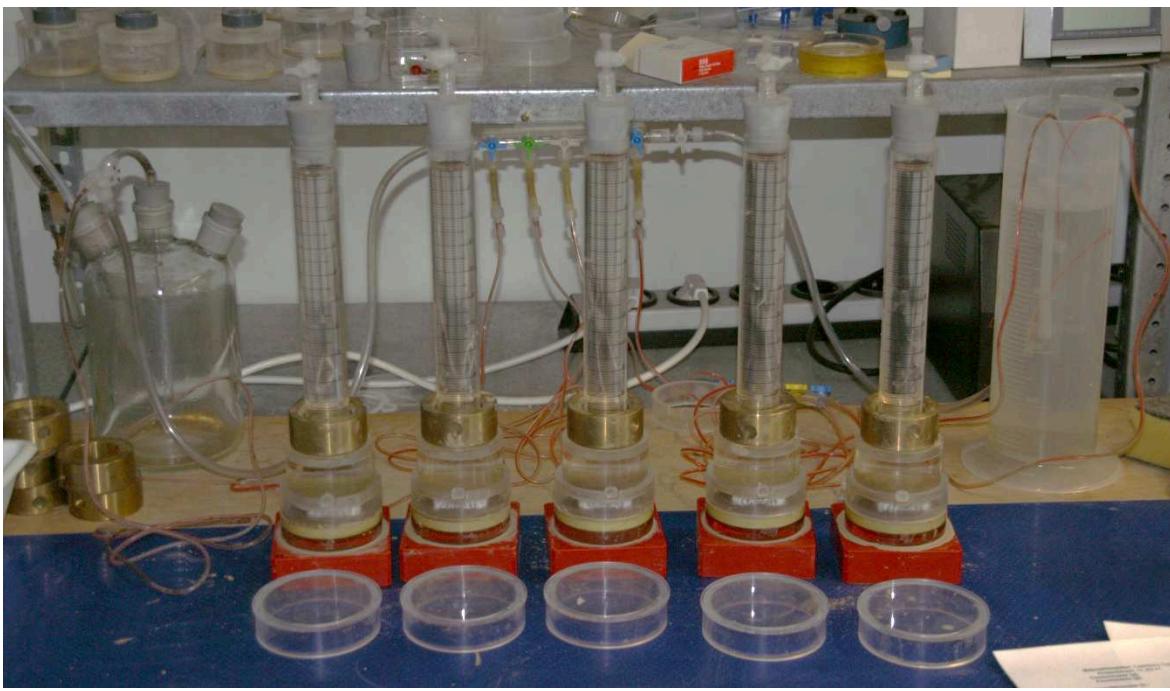
Bei hoher relativer Luftfeuchte erfolgt der gesamte Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt vor, wenn ein Baustoff in Wasser getaucht oder auch durch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient charakterisiert dabei die Eigenschaft eines weitgehend trockenen Baustoffes, Wasser von der Oberfläche her aufzusaugen und flüssiges Wasser in tiefer liegenden Porenraum zu transportieren. Während der Messung durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt. Der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht daher der Steigung der Wasseraufnahmekurve bezogen auf die Quadratwurzel der Zeit und wird üblicherweise in  $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-0.5}$ , bzw.  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-0.5}$  angegeben. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in einer Probe ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt,  $\theta_{cap}$ , [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] bezeichnet wird.



**Abbildung 1:** Wasseraufnahmegeräte

### 3.6 Flüssigkeitsleitfähigkeit (Wasserpermeabilität oder Wasserleitfähigkeit nach ISO 17312 [7])

Sie ist ein direktes Maß für die Fähigkeit eines Porenraumes, wie schnell Wasser im jeweiligen Poresystem transportiert werden kann. Sie verknüpft den Kapillardruck, als antreibende Kraft, mit der Menge Wasser, welche in dem betrachteten Zeitintervall durch die Poren fließt. Während der Messungen weist die Materialprobe einen definierten Feuchtegehalt auf. Bei vollständiger Sättigung nehmen sämtliche Poren am Feuchtetransport teil, womit die Flüssigwasserleitfähigkeit maximal ist. In diesem Fall spricht man von der gesättigten Wasserleitfähigkeit,  $k_s$ . Bei abnehmenden Sättigungsgraden werden die jeweils größeren Poren zuerst entwässern und sind mit Luft gefüllt. Folglich sinkt mit abnehmendem Sättigungsgrad die Wasserleitfähigkeit und wird je nach Bezug mit  $k_\theta$  (Bezug zum Wassergehalt),  $k_\psi$  (Bezug zum Kapillardruck) oder  $k_\phi$  (Bezug zur relativen Luftfeuchte) bezeichnet. Die Einheit der Wasserleitfähigkeit ist eine Geschwindigkeit und wird in  $[cmd^{-1}]$ ,  $[cms^{-1}]$ ,  $[md^{-1}]$ , bzw. nach dividieren durch die Gravitation in  $[s]$  angegeben.



**Abbildung 2:** Tensionsinfiltrometer

#### 4 Ermittlung der hygrothermischen Materialfunktionen

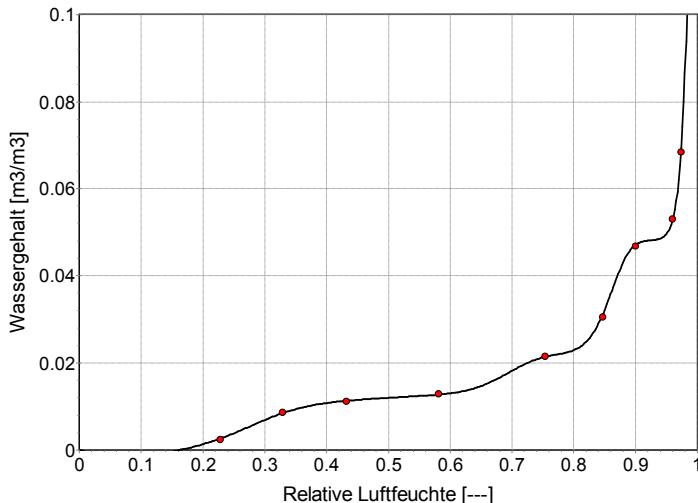
Die hygrothermische Bauteilsimulation bzw. Feuchte- und Wärmetransportberechnungen basieren auf der numerischen Lösung von gekoppelten Differentialgleichungen mit feuchte- und temperaturabhängigen Transport- und Speicherkoefizienten. Die Laborexperimente hingegen liefern Basiskennwerte (oder -parameter), die einer Interpretation bedürfen, um als Parameter der Transport- und Speicherkoefizienten verwendet werden zu können. Die Interpretation der Laborkennwerte zur Generierung von Materialfunktionen, welche die Materialeigenschaften adäquat beschreiben, ist die wesentliche Aufgabe der Materialmodellierung. Das hier verwendete Materialmodell umfasst ein Set von Materialfunktionen einschließlich der Material- und Modellparameter. Die Entwicklung des Materialmodells erfolgt notwendigerweise in drei Stufen: Modellierung, Kalibrierung und Validierung.

- **Modellierung** - Auswahl geeigneter Materialfunktion mit ausreichender Flexibilität zur Beschreibung der hochgradig nichtlinearen Abhängigkeiten der Materialeigenschaften
- **Kalibrierung** - Bestimmung weiterer Funktionsparameter durch Simulation von Laborexperimenten und Optimierung
- **Validierung** - Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Materialverhalten anhand von Experimenten, die nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden

Das Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung besitzt eine Reihe interner Funktions- und Materialparameter. Die internen Funktionsparameter werden durch Kalibrierung bestimmt. Dem Nutzer sichtbar ist ein Mindestsatz an Messdaten, die als Basisparameter bezeichnet werden. Die Basisparameter stellen eine Mindestanforderung an die durchzuführenden Laborexperimente dar. Zusätzliche Messungen erhöhen die Genauigkeit der

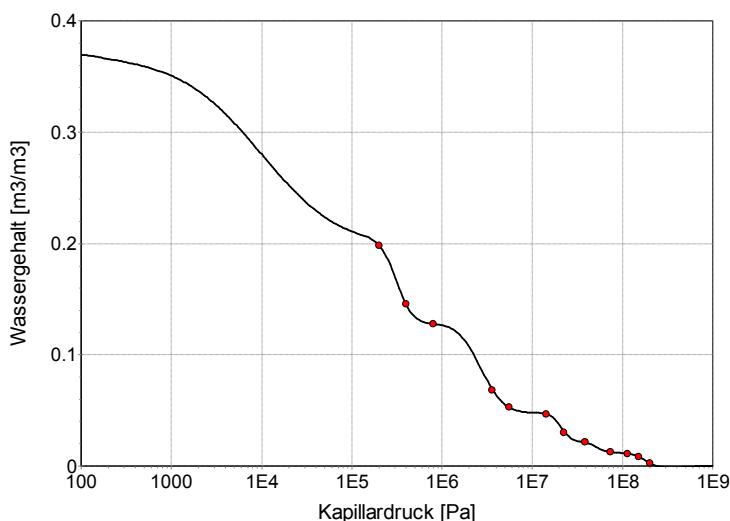
Materialcharakterisierung und lassen daher auch genauere Simulationsergebnisse erwarten. Die zusätzlichen Messpunkte fließen als zusätzliche Daten in das Modell ein und präzisieren damit die durch die zugrundeliegenden physikalischen Modellvorstellungen entwickelten Funktionsverläufe.

#### 4.1 Hygrische Sorptionsisotherme und Wasserretentionsfunktion

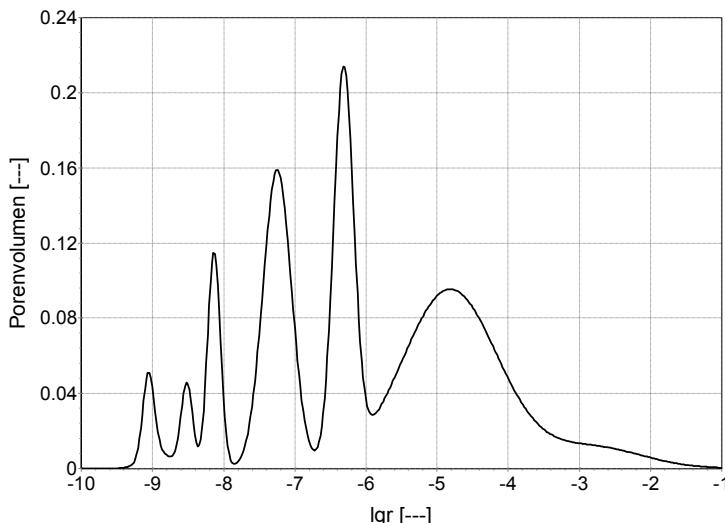


**Abbildung 3:** Hygrische Sorptionsisotherme (Desorption) für ein ausgewähltes Material

In einem der ersten Schritte ist dabei die Feuchtespeicherfunktion an die Messwerte der WasserRetention und der hygrischen Sorptionsisotherme anzupassen, wie in „Abbildung 3“ und „Abbildung 4“ dargestellt. Der Flüssigtransport leitet sich über ein Porenmodell aus der Feuchtespeicherfunktion ab. Dazu wird aus der angepassten Feuchtespeicherfunktion die sogenannte Porenvolumenverteilung generiert. Unter der Annahme von definierten Äquivalenzporenradien leitet sich die Porengrößenverteilung ab („Abbildung 5“).



**Abbildung 4:** Funktion der Wasserspeicherung (Desorption) für ein ausgewähltes Material im hygrokopischen und überhygrokopischen Bereich, aufgetragen gegen den Kapillardruck.

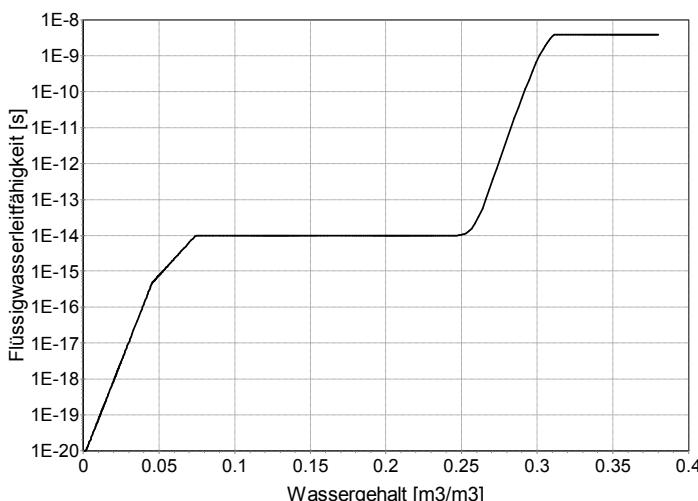


**Abbildung 5:** Porenvolumenverteilungsfunktion für ein ausgewähltes Material, aufgetragen gegen den Logarithmus des Porenradius.

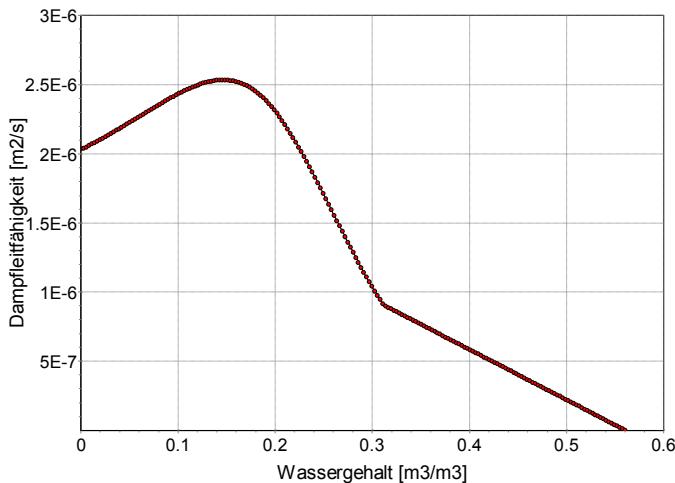
#### 4.2 Hydraulische Leitfähigkeit und Wasserdampfdiffusion

Zur Ableitung der Transportfunktionen für Flüssigwasser und Wasserdampf aus der Porenstruktur werden zwei Modelle miteinander kombiniert: Die Flüssigwasserleitfähigkeit wird über ein einfaches Porenmodell nach Burdine aus der Porenstruktur abgeleitet. Die erhaltene Funktion wird anschließend normiert und mit der gemessenen Leitfähigkeit bei kapillarer Sättigung skaliert. Die Leitfunktion knüpft im überhygrokopischen Bereich an die Dampfdiffusionsmessungen bei höheren Luftfeuchten (Wet cup) an und kann oberhalb der kapillaren Sättigung durch weitere Leitfähigkeitsmesswerte (Darcy-Leitfähigkeit im höher gesättigten Feuchtebereich) ergänzt werden.

Es erlaubt die Modellierung der Feuchteabhängigkeit des Dampftransports und liefert zusätzlich eine Skalierungsfunktion für die Flüssigwasserleitfähigkeit im überhygrokopischen Bereich, deren physikalische Ursache in der Unterbrechung des kapillaren Flüssigwassertransports bei Vorhandensein von Flüssigkeitsinseln besteht.



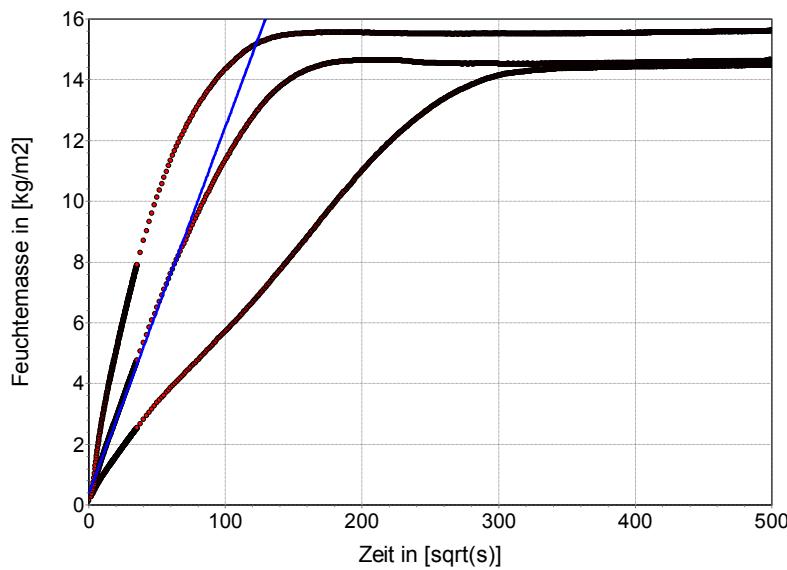
**Abbildung 6:** Funktion der kapillaren Leitfähigkeit für ein ausgewähltes Material, aufgetragen gegen den volumetrischen Wassergehalt.



**Abbildung 7:** Funktion der Wasserdampfdiffusion für ein ausgewähltes Material, aufgetragen gegen den volumetrischen Wassergehalt.

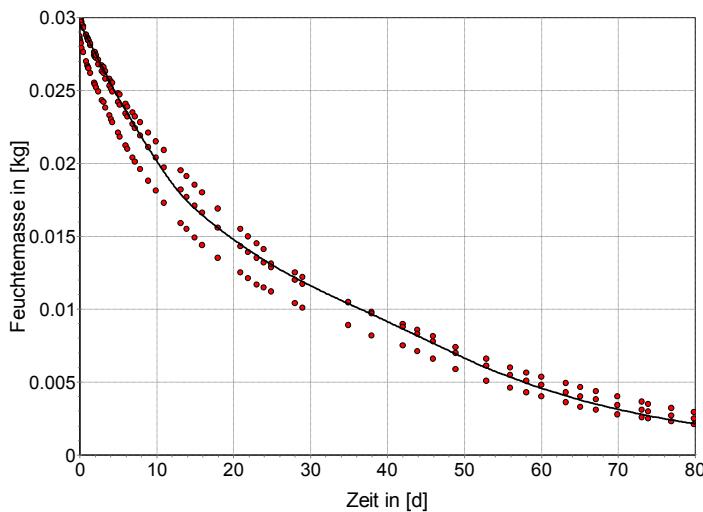
Aus „Abbildung 6“ und „Abbildung 7“ wird deutlich, dass eine größere Anzahl an Messwerten bei der Anpassung der Feuchtespeicherfunktion auch einen Zuwachs an Genauigkeit bedeutet. Da sich aus dieser Funktion auch die Transportfunktion ergibt, ist dieser Aspekt beachtenswert. In der weiteren Anpassung werden die Leitfähigkeitsfunktionen für flüssiges Wasser und für Wasserdampf entwickelt und angepasst. Anschließend werden diese Funktionen mit Hilfe der numerischen Simulation kalibriert.

Die Leitfunktionen enthalten zwei Parameter,  $k_{corr}$  und  $h$ , die der Kalibrierung des Materialmodells an zusätzlichen Laborexperimenten dienen. In beiden Fällen der Kalibrierung werden die Parameter in der numerischen Simulation variiert bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment gegeben ist. Der Parameter,  $k_{corr}$  dient der Skalierung der Flüssigwasserleitfähigkeit im kapillaren Feuchtebereich und wird aus dem Wasseraufnahmeexperiment bestimmt. Mit dem Parameter  $h$  können beide Funktionen, die Flüssigwasserleitfähigkeit und der Wasserdampfdiffusion, im überhygroskopischen Feuchtebereich skaliert werden. Dies geschieht anhand des Trocknungsexperimentes.



**Abbildung 8:** Verifizierung der Materialfunktionen anhand von Aufsaugexperimenten für ein ausgewähltes Material. Abgebildet sind die Massenzunahmen der Materialproben  $\text{kg}/\text{m}^2$  in ihrem zeitlichen Verlauf: Datenpunkte (rot), Simulationsrechnung (Linie).

Zur Kontrolle des überhygrokopischen Feuchtebereiches dient die Simulation des Aufsaugversuches (siehe „Abbildung 8“). Dazu wird ein in seinen Abmessungen den Proben im Labor entsprechender Körper modelliert und an seiner Unterseite mit Wasser beaufschlagt. Die Wasseraufnahme wird über die Zeit ausgegeben und mit den Messdaten aus dem Labor verglichen. Die Leitfunktion wird dabei solange variiert, bis Messung und Rechnung die gewünschte Übereinstimmung zeigen.



**Abbildung 9:** Verifizierung der Materialfunktionen anhand von Verdunstungsexperimenten für ein ausgewähltes Material. Abgebildet sind die Massenabnahmen zweier unterschiedlicher Materialproben in ihrem zeitlichen Verlauf: Datenpunkte (rot), Simulationsrechnung für eine Materialprobe (schwarz).

Das Ergebnis einer solchen Funktionsoptimierung ist exemplarisch in „Abbildung 8“ und „Abbildung 9“ für ein ausgewähltes Material dargestellt. Die Verifizierung der Funktionen erfolgte über das Simulationsprogramm DELPHIN.

Der Grenzbereich zwischen hygrokopischem und überhygrokopischem Feuchtebereich wird durch die Simulation des Trocknungsverhaltens kalibriert. Bei Kenntnis der genauen Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit der radial-symmetrisch-dreidimensionalen Simulation, kann neben den Anfangs- und Übergangsbedingungen auch der Temperatureinfluss auf das Trocknungsverhalten berücksichtigt werden. Der Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Trocknungsverhalten ist in „Abbildung 9“ dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass mit der Anpassung nach schon wenigen Parametervariationen eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden kann.

Im Ergebnis steht ein im gesamten Feuchtebereich kalibriertes und verifiziertes, sowie auf thermodynamischen Grundlagen basierendes Transportmodell für gekoppelten Flüssigwasser-, Wasserdampf- und Wärmetransport. Das Modell ist für die wissenschaftliche Weiterentwicklung offen, z.B. auf den Salztransport und Salzkristallisationsprozesse, Hysteresis, etc. erweiterbar.

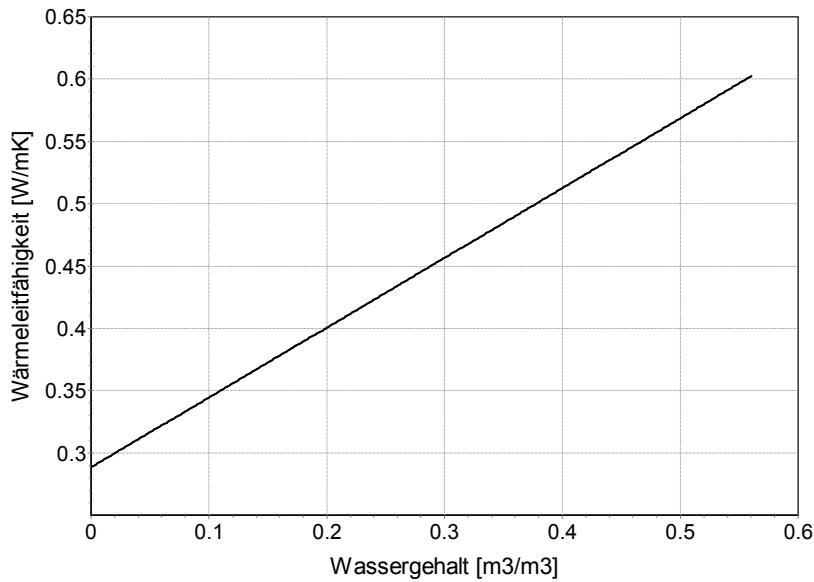
#### 4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen wird im DELPHIN-Materialmodell als Funktion des Wassergehaltes aufgefasst. Dem liegt im Standardfall eine einfache Parallelschaltung der Wärmeströme durch den Feststoff und den Porenraum des Baustoffes zugrunde. Ersetzt man schrittweise die Luft im Porenraum durch Wasser, erhält man eine lineare Funktion der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt. Der Anstieg ist gleich der Wärmeleitfähigkeit des Wassers.

$$\lambda(W) = \lambda_{trocken} + \lambda_{Wasser} \cdot W \quad (3)$$

$\lambda_{trocken}$  Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials in W/mK  
 $\lambda_{Wasser}$  Wärmeleitfähigkeit von Wasser (=0.56 W/mK)  
 $W$  Volumetrischer Wassergehalt in  $\text{m}^3/\text{m}^3$

Zu beachten ist, dass es sich bei  $\lambda_{trocken}$  nicht um den Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit handelt, der üblicherweise ausgehend von den Messwerten einen Feuchteaufschlag enthält.



**Abbildung 9:** Wärmeleitfähigkeit für ein ausgewähltes Material als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes.

Die oben abgebildete Funktion stellt den Standardfall im DELPHIN-Materialmodell dar, wenn nur die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials gegeben ist. Darüber hinaus können beliebige Funktionen durch Spline-Interpolation verwendet werden, wenn die entsprechenden Datenpunkte eingegeben werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellte Materialcharakterisierung beschreibt das Materialverhalten (Feuchtigkeitsspeicherung, Dampfdiffusion, Flüssigkeitsleitung) unter Laborbedingungen. Die Materialfunktionen werden durch Simulation von Experimenten und durch beste Anpassung an die Laborexperimente kalibriert. Die Materialparameter und -funktionen wurden entsprechend thermodynamischer Modellierungsprinzipien entwickelt, um durch die weitgehende Vermeidung von einschränkenden Annahmen deren allgemeine Anwendbarkeit möglichst groß zu halten. Insbesondere wurden zu keinem Zeitpunkt der Ableitung isotherme Bedingungen vorausgesetzt.

Dies bedeutet, dass die oben gezeigten Materialfunktionen unter nicht-isothermen Bedingungen gültig sind, auch wenn die Kalibrierung der Materialfunktionen im Labor unter konstanten Temperaturen durchgeführt wird. Infolgedessen sind alle Experimente, die für die Materialcharakterisierung verwendet werden, unter isothermen Bedingungen durchführbar. Nicht-isotherme Experimente bieten zusätzliche Möglichkeiten zur Verifikation und Validierung des Materialmodells. Die Materialcharakterisierung folgt der Prämisse, dass Trocknungsprozesse mit höherer Genauigkeit simuliert werden können als Wasseraufnahmeprozesse. Dies ist gerechtfertigt, da das instationäre Trocknungs- und Befeuchtungsverhalten von Materialien in erster Linie kaum durch Wasseraufnahmeprozesse geprägt wird, solange kein direkter Kontakt des trockenen Materials mit flüssigem Wasser besteht.

Im Labor wird die Desorptions-Feuchtespeicherfunktion vollständig gemessen und das Verdunstungsexperiment findet für die primäre Kalibrierung Anwendung. Eine sekundäre Kalibrierung erfolgt durch die Verwendung der Wasseraufnahmekurve, allerdings ohne dass eine vollständig gemessene Adsorptions-Feuchtespeicherfunktion zur Verfügung steht. Die Feuchteaufnahme infolge Schlagregen beinhaltet ohnehin viele Unsicherheiten und kann nur mit geringer lokaler Genauigkeit beschrieben werden.

Die Laborprüfungen müssen generell so konzipiert werden, dass die Charakteristik der Schädigungsmechanismen erfasst wird. In vielen Fällen ist die Nachsimulation von Laborexperimenten zielführend, weil dadurch das Zeitverhalten der Schädigungsprozesse abgebildet wird und die Modelle kalibriert werden können. Die Basis dafür ist eine adäquate modellhafte Beschreibung der Materialeigenschaften.

Daraus ergibt sich ein wichtiges Ziel für die Weiterentwicklung des Materialmodells. Für entsprechende Softwareprogramme soll ein Modell geschaffen werden, welches es erlaubt, die im Labor gemessenen Kennwerte in korrespondierende Materialcharakteristiken zu überführen. Dadurch wird der Austausch von Materialcharakteristiken zwischen verschiedenen Softwareprogrammen ermöglicht. Auf dieser Basis ist es möglich, Planer und Ingenieure in der Breite anzusprechen und die entsprechenden Verfahren in der Praxis zu umzusetzen.

## Literatur

- [1] DELPHIN, <http://www.bauklimatik-dresden.de/delphin>
- [2] WUFI, <https://wufi.de/de>
- [3] Wärme- und feuchtechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (ISO 12572:2001); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2001, Beuth 09/2009
- [4] Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren; Deutsche Fassung EN ISO 11274:2014, Beuth 07/2014
- [5] Wärme- und feuchtechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2013); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2013, Beuth 12/2013
- [6] Wärme- und feuchtechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016, Beuth 12/2016
- [7] Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit - Sand- und Kiesfraktion; ISO 17312, ANSI 03/2005

# Simulationsgestütztes Monitoringsystem für städtische Innendämmungen in Erdnähe

Hans Hafellner

---

## 1 Einleitung

Innendämmssysteme werden zurzeit in der praktischen Anwendung nicht an die bauschadensfreien Grenzen gebracht, da das entsprechende leistbare Monitoring fehlt.

Durch die anhaltende starke Bevölkerungszunahme in den Städten wird die Ertüchtigung von vorhandenen Gebäuden zur unbedingten Notwendigkeit. Oft kommen für die energetische Sanierung aufgrund des Denkmalschutzes, erhaltenswerter Fassaden, schmaler Außentreppen oder bei Balkonen, engen Gassen, Durchfahrten oder Grenzbebauungen Innendämmungen zur Anwendung. Eine zuverlässige Vorgehensweise um Bauschäden bei der Installation von Innendämmssystemen zu vermeiden ist der Einbau von teuren und aufwändigen Monitoringsystemen die Aufschluss über den Zustand des Bauteils geben. Hygrothermische Simulationen liefern bereits im Planungsstadium Aufschluss über mögliche Bauschäden bzw. Ausführungsdetails, sind jedoch sehr kosten- und zeitintensiv.

Aus der einschlägigen Forschung sind zwar zahlreiche Innendämmprojekte bekannt. Diese befassen sich jedoch selten mit der – besonders kritischen – Situation des erdnahen Bereichs und so gut wie nie mit hygrothermischen Extremsituationen.

Dieser Beitrag stellt den ersten Schritt der Entwicklung eines neuartigen, sensorlosen Monitoringsystems für Innendämmungen, insbesondere von Bestands- aber auch Neubauten dar, dessen Systematik weltweit angewendet werden kann. Ziel ist die Weiterentwicklung von teuren, in den Bauteilen verbauten Sensoren samt Datenloggersystemen, die nur von Fachpersonal bedient werden können, zu einem leistbaren, einfach und fehlertolerant zu nutzenden System mit nur einem smarten Hygrometer, das in Verbindung mit einer validierten Produktdatenbank Bauschadensfreiheit sicherstellt.

## 2 Problemstellung für den städtischen Bereich

Die Prognosen der Bevölkerungsveränderung zeigen eine Zunahme der Bevölkerung bis 2030 in den Ballungsräumen um bis zu 20% gegenüber den Werten von 2014. Für Wien wird von einer Zunahme um 15 % ausgegangen also ca. 270.000 Menschen. Um diese Zahl zu verdeutlichen kann man sich vorstellen, dass alle Bewohner von Graz nach Wien siedeln. [1] Für Graz ist eine Zunahme von 20% prognostiziert, das bedeutet 54.000 Personen in nur 16 Jahren. [2]

Diese Menschen benötigen Wohnraum und eine nachhaltige effiziente Lösung ist die Nutzung der vorhandenen Gebäude, demzufolge ist eine ressourcenschonende Nachverdichtung notwendig. Die thermische Sanierung der bestehenden Gebäude stellt nicht nur einen wichtigen Beitrag zur wirkungsvollen Reduktion der CO<sub>2</sub> – Emission dar [3], sondern auch eine notwendige Maßnahme für die Schaffung von adäquatem Wohnraum.

Die Anforderungen an Energieeinsparung und Wärmeschutz steigen permanent (siehe OIB Richtlinie 6: Verringerung von Heizwärme- und Primärenergiebedarf, CO<sub>2</sub> Ausstoß etc. alle zwei Jahre bis 2020). Nicht nur in Österreich, sondern in ganz Europa werden diese Ziele für Neu-, Zu- und Umbauten verschärft (vgl. Energieeinsparverordnung EnEV für Deutschland). Um die bereitgestellte Energie effizient zu nutzen sind wärmedämmende Maßnahmen nicht nur bei Neubauten, sondern besonders bei den Bestandshäusern notwendig. Die Zahl der Neuerrichtungen von Gebäuden geht stetig zurück und die Förderungen für Renovierungen wurden stark angehoben um diese zu forcieren. Die OIB Richtlinie versteht unter einer „größeren Renovierung“, dass 25% der Oberfläche der Gebäudehülle renoviert wird und auch zur Erlangung der Förderungen von Bund und Land werden energiesparende und ökologische Maßnahmen gefordert. [4] Statt Einzelmaßnahmen soll ein Bündel an thermisch relevanten Maßnahmen getroffen werden um möglichst nahe am Neubaustandard zu sein. Die Sanierungsrate (= Verhältnis von in einem Jahr thermisch instandgesetzten Wohneinheiten in Bezug auf den Gesamtbestand) liegt in Österreich bei rund 1% was bedeutet, dass erst in 100 Jahren der Gebäudebestand komplett saniert wäre. [5] Es liegt auf der Hand, dass diese Rate angehoben werden muss um die oben genannten Anforderungen schnellstmöglich umzusetzen.

Im Jahr 2011 gab es in ganz Österreich 1.973.979 Wohngebäude und davon sind 47% vor 1980 gebaut. Die Wohnungsanzahl in Österreich im Jahr 2011 betrug 4.441.408 wovon 66% vor 1980 errichtet wurden. [6]

Bei der Datenerhebung im Jahr 2014 standen in Österreich 22.471 Profanbauten unter Denkmalschutz. [7] Bei diesen denkmalgeschützten Gebäuden, bei erhaltenswerten Fassaden, schmalen Außentreppen, Balkonen, Gassen, Passagen, Durchfahrten oder bei Grenzbebauungen sind Dämmmaßnahmen an der Außenseite nicht möglich. Die gesamtheitliche Betrachtung einer thermischen Sanierungsmaßnahme zeigt jedoch, dass Mehrfamilienwohnhäuser die vor 1980 erbaut wurden ein Einsparungspotenzial von 66 bis 76 % haben. (siehe „Tabelle 1“) [8]

**Tabelle 1:** Energiebedarf nach Bauperiode und Energieeinsparungspotential des Gebäudebestandes durch thermische Sanierung

Bauperiode	HWB ohne Sanierung [kWh/m <sup>2</sup> a]	Einsparung durch thermische Sanierung [%]
vor 1900	125	66
1900 – 1945	178	76
1945 – 1960	154	73
1961 – 1980	155	73
> 1980	92	54

**Tabelle 2:** Vergleich der U-Werte von Gründerzeithäusern mit Anforderungen vom Neubaustandard bzw. Einzelmaßnahmen bei Renovierungen.

Bau- periode	<b>Kellerdecke zu unbeheiztem Keller</b> <b>erforderlich Einzelmaßnahmen 0,35 W/m²K (bzw. Neubau 0,40 W/m²K) nach OIB 6 - 2015</b>						
	OIB 6 [W/m²K]	erf. ID [cm] ( $\lambda =$ 0,04)	VF [-]	HfE [W/m²K]	erf. ID [cm] ( $\lambda =$ 0,04)	VF [-]	gemittelter VF [-]
ab 1900	1,20	8 (7)	3,4 (3,0)	1,00	7 (6)	2,9 (2,5)	3,2 (2,8)
ab 1945	1,10	8 (6)	3,1 (2,8)	1,45	9 (7)	4,1 (3,6)	3,6 (3,2)
ab 1960 bis 1980	1,35	8 (7)	3,9 (3,4)	1,35	8 (7)	3,9 (3,4)	3,9 (3,4)
Bau- periode	<b>Außenwände</b> <b>Erforderlich Einzelmaßnahmen 0,31 W/m²K (bzw. Neubau 0,35 W/m²K) nach OIB 6 – 2015</b>						
	OIB 6 [W/m²K]	erf. ID [cm] ( $\lambda =$ 0,04)	VF [-]	HfE [W/m²K]	erf. ID [cm] ( $\lambda =$ 0,04)	VF [-]	gemittelter VF [-]
ab 1900	1,50	10 (9)	4,8 (4,3)	1,40	10 (9)	4,5 (4,0)	4,7 (4,2)
ab 1945	1,30	10 (8)	4,2 (3,7)	1,35	10 (8)	4,4 (3,9)	4,3 (3,8)
ab 1960 bis 1980	1,20	10 (8)	3,9 (3,4)	1,15	9 (8)	3,7 (3,3)	3,8 (3,4)

ID = Innendämmung; VF = Verbesserungsfaktor; HfE = Handbuch für Energieberater; (Bei den angegebenen Werten aus HfE handelt es sich grundsätzlich um Mittelwerte aus der Erfahrung und nicht um schlechtest denkbare Werte.)

Dieses Einsparungspotential soll nicht verloren gehen und somit sind Innendämmungen die einzige effiziente und ressourcenschonende thermische Sanierungsmaßnahme für Gebäude mit diesen hohen Ansprüchen. Im Sockelbereich führen jedoch Wärmebrücken in Kombination mit starken Beanspruchungen (siehe Kapitel 4) zu Kondensation und Schimmelbildung. Innenraumdämmungen können auf Grund von vorhandenen Innenwänden, Zwischendecken und Fundamentplatten nicht wärmebrückenfrei angebracht werden, sodass die Sanierungsmaßnahmen sorgfältig geplant werden müssen um Bauschäden zu vermeiden.

Somit stellt die anspruchsvollste Gruppe, der sogenannte „Worst Case“, der zu sanierenden Wohngebäude, jedoch zugleich mit dem höchsten Potential an Energieeinsparung, jene aus der Bauperiode von 1900 bis 1945 dar. Vom Gesamtbestand sind es 23% der Wohngebäude und 25% der darin befindlichen Wohnungen von ganz Österreich. [9] Die Kellerdecke eines Hauses, das bis 1945

erbaut wurde hat einen mittleren U-Wert von 1,10 W/m<sup>2</sup>K. [10] Somit liegt er über dem dreifachen Wert der derzeitigen Anforderung von 0,35 W/m<sup>2</sup>K. [11] Noch gravierender ist der Unterschied bei den Außenwänden eines Gebäudes bis 1945 mit einem mittleren U-Wert von 1,45 W/m<sup>2</sup>K der beinahe dem vierfachen der geforderten 0,31 W/m<sup>2</sup>K entspricht. (siehe „Tabelle 2“)

Mit wenigen Zentimetern Innendämmung kann also bei diesen Gebäuden ein thermischer Neubaustandard erreicht werden und ganze Stadtteile saniert werden, die für die Schaffung von angemessenem Wohnraum in der Nachverdichtung unbedingt erforderlich sind.

### 3 Konventionelles Monitoring von Innendämmungen

Um eine instationäre hygrothermische Simulation durchführen zu können werden die Außenklimabedingungen des Standortes benötigt. Diese umfassen: [12]

- Temperatur [°C]
- Relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Niederschlag [l/m<sup>2</sup>]
- Direktstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m<sup>2</sup>]
- Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m<sup>2</sup>]
- Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m<sup>2</sup>]
- Windrichtung [°]
- Windgeschwindigkeit [m/s]

Um die zur Verfügung gestellten Daten im Simulationsprogramm verwenden zu können müssen diese auch noch dementsprechend aufbereitet werden. Auf Grund des Umfangs der notwendigen Daten für eine realistische Simulation und um diese aktuell zu halten entstehen hohe Kosten für die AnwenderInnen.

Die Innenklimabedingungen werden entweder als konstante Randbedingungen angenommen, von den zur Verfügung stehenden Außenklimabedingungen abhängig gemacht oder in den seltensten Fällen mittels Sensortechnik tatsächlich gemessen. Um die Realität in den Simulationen abbilden zu können sind die vorherrschenden Innenklimabedingungen anzuwenden, da unterschiedliche Raumnutzungen (Büro, Wohnraum, Schlafzimmer, Badezimmer...) auch unterschiedlichste Simulationsergebnisse hervorrufen. Abermals entstehen jedoch hohe Kosten für die AnwenderInnen.

Das zurzeit einzige Regelwerk (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA-Merkblätter) zu hygrothermischen Simulationen im deutschsprachigen Raum mit Normencharakter weist Bewertungskriterien für Frostbeständigkeit, Gleichgewichtsfeuchte bei gipshaltigen Untergründen und Porenfeuchte in Holzeinbauteilen aus. [13]

Jedoch zeigt dies ebenfalls nicht für jedes Dämmsystem den Grenzwert und damit die Ausnutzbarkeit von Innendämmungen auf. Eine umfangreiche Literaturrecherche (Auszug siehe „Tabelle 3“) zeigte, dass seit Jahren versucht wird allgemein gültige Regeln für Innendämmssysteme zu entwickeln, wobei in den

Forschungsprojekten immer wieder Sensoren verbaut werden und projektspezifisch festgestellt wird, ob die verbauten Systeme schadensfrei bleiben oder nicht.

**Tabelle 3:** Auszug aus der Literaturrecherche von Innendämmprojekten [14-22]

Nr.	Projekt	Nutzung	Baujahr	Sanierung
1	Alte Spinnerei Felixdorf	Wohngebäude	1869	2011
2	Bauteil Z, Kabelwerk	Wohngebäude	Wiederaufbau nach WK II	2006
3	Donaufelder Straße	Wohngebäude	2012	-
4	Haus Gächter - Irving	Wohngebäude	2011	-
5	Landesarchiv Bregenz	Archiv	1931	2003
5	Landesmuseum Bregenz	Museum	1905	2012
6	Stadtvilla	Wohngebäude	1901	
7	Wohnhaus Stieldorf	Wohngebäude	1913	2006
8	Wohnhaus Wegerer	Wohngebäude	spätes 19. Jhd.	2010
9	Privatwohnung R. Schild	Wohngebäude	1960	2010
10	Makartvilla	Büro	-	2014
11	Workers residential home	Arbeiter Unterkunft	Vorkriegsbau	2014
12	OEKO-ID	Kindergarten	-	2013
13	Gründerzeithaus in Dresden	Wohngebäude	1895	1996
14	Fachwerkhaus in Niedersachsen	Wohngebäude	-	2002
15	Herrenschießhaus in Nürnberg	Büro	1583	2002
16	Bahnmeisterei in Senftenberg	-	-	-
18	Haus des Handwerks in Görlitz	-	1525 Wiederaufbau 1726	2004
19	ehemalige Salamander AG	Wohn-, Geschäfts- und Dienstleistungs- immobilie	1885	2009
20	Zöllnerviertel Weimar	Wohngebäude	~1923	2016
21	Landratsamt in Annaberg-Buchholz	Verwaltungsgebäude	-	2015
22	Rote Kaserne Frankfurt/Oder	Wohngebäude	1888	2011
23	Jugendzentrum Homburg/Efze	Jugendzentrum	1904	2014
24	Zollhäuser Leipzig	Wohngebäude	Ende 19. Jhd.	2012

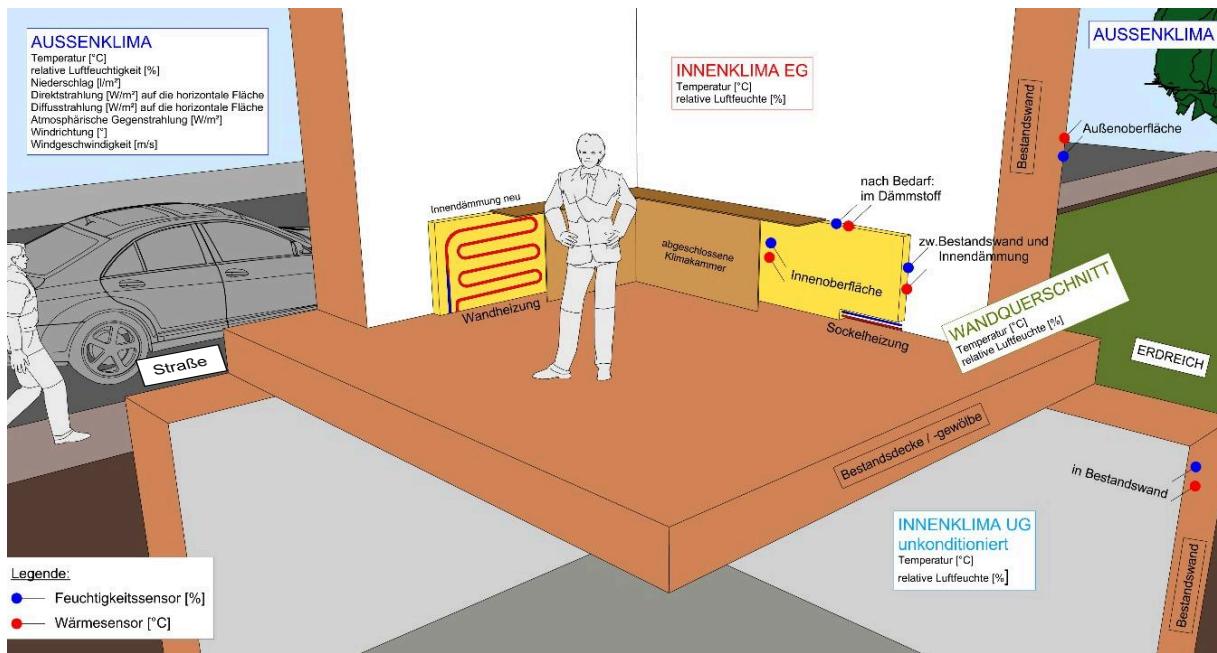
Nr.	Projekt	Nutzung	Baujahr	Sanierung
25	The Metropolitan Gardens	Wohngebäude	1936	2015
26	Remensniderhaus 1521 in Herford	Wohn- und Geschäftshaus	1521	2001
27	Vierständer-Fachwerkhaus von 1750	Wohngebäude	1750	2000
28	Stadthaus von 1914	Wohngebäude	1914	2003
29	Stadtvilla in Bielefeld	Wohngebäude	-	2007
30	Samariterhaus Heidelberg	Wohn- und Geschäftshaus	1906	2008
31	Altbau in Duisburg Hochfeld	Wohn- und Bürogebäude	-	2010
32	Lange Gasse 7 in Quedlinburg	Wohngebäude	~1780	2004
33	Wasserturm Flensburg	Wohngebäude	1910	2011
34	KA 7 Kaiserstraße	Wohngebäude	1904	2013
35	Kellerinnendämmung 70er-Jahre Wohngebäudes	Wohngebäude	~1975	2014

Dies verdeutlicht, dass bei keiner dieser Forschungsarbeiten das untersuchte Innendämmssystem unter kontrollierten Umständen an seine Grenzen gebracht wurde. Es konnte lediglich festgestellt werden, ob die ausgeführten Sanierungsmaßnahmen unter den gegebenen Randbedingungen funktionierten oder nicht und somit konnten hauptsächlich projektspezifische, aber wenig zufriedenstellende oder keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden.

#### 4 Simulationsgestütztes Monitoring von Innendämmungen im erdnahen Bereich

Die Randbedingungen von erdberührten bzw. unterkellerten Aufenthaltsräumen verursachen meist starke Feuchtigkeitsbelastungen in den angrenzenden Bauteilen, da eine gleichzeitige Einwirkung von Schlagregen, aufsteigender Feuchtigkeit, Spritzwasser und Wasserdampfdiffusion gegeben ist. Zusätzlich führen geometrisch-, material- und oftmals auch umgebungsbedingte Wärmebrücken zu Kondensation und Schimmelbildung im Sockelbereich. Innenraumwärmespeicherungen können auf Grund von vorhandenen Innenwänden, Zwischendecken und Fundamentplatten nicht wärmebrückenfrei angebracht werden. Um definitive Aussagen bezüglich der Leistungsfähigkeit eines Dämmssystems treffen zu können, ist es daher erforderlich, alle diese Aspekte zu berücksichtigen und gleichzeitig das Innenklima auf einen maximalen Wert einzustellen, der ausreichende Sicherheit gegenüber den in der Praxis auftretenden Situationen gewährleistet. Die Kosten für den Einzelanwender müssen gesenkt werden ohne die Sicherheit der Bauschadensfreiheit zu mindern. Um dieses Gesamtziel zu erreichen, ist es notwendig anhand eines Projektes die

Vorgehensweise, Möglichkeiten und Grenzen zur Ermittlung der allgemein gültigen Versagensvoraussage von Innendämmssystemen zu bestimmen.  
(siehe „Abbildung 1“)



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau für simulationsgestütztes Monitoring von Innendämmungen im erdnahen Bereich

Als Projekt wurden zwei Gründerzeithäuser ausgewählt in denen Innendämmssysteme verbaut werden. Um deren Leistungsgrenzen zu erforschen werden mobile Klimakammern um die Innendämmung montiert. Die Temperatur wird mit einer Heizeinrichtung und die relative Luftfeuchte mit Befeuchtungsgeräten auf die gewünschten Werte eingestellt. Zu beachten ist, dass die Klimakammer luftdicht abgeschlossen ist, jedoch offenbar bleibt um Adjustierungen der Temperatureinstellung bzw. der relativen Luftfeuchte vorzunehmen.

Konkret werden innovative Aerogel- und ökologische Zellulose-Innendämmssysteme im Erdgeschoß einer innerstädtischen Gründerzeitbebauung installiert und über den Zeitraum von drei Kondensations- und zwei Austrocknungsperioden in je drei mobilen Klimakammern an die Grenzen ihrer Belastbarkeit geführt. Durch individuell einstellbare Randbedingungen können ungünstigste zukünftige Nutzerverhalten bzw. Raumnutzungen modelliert werden. Die Montage erfolgt auf unterschiedlich orientierten und belasteten Außenmauern. Parallel werden hygrothermische Simulationsberechnungen durchgeführt, welche mittels Vor-Ort-Messungen validiert werden und dadurch gesicherte Aussagen über die Anwendbarkeit der untersuchten Innendämmssysteme in zukünftigen Einbausituationen ermöglichen. Die Vor-Ort-Messungen werden als konventionelle Monitoringsysteme ausgeführt. Feuchte- und Temperatursensoren in den Außenbauteilen sowie Sensoren zur Erfassung der Innen- und Außenklimate zeichnen mit Hilfe von Datenloggersystemen die vorherrschenden Bedingungen auf.

Die Schaffung von Bewertungskriterien, die allgemeine Gültigkeit haben, ist somit über die Maximalbelastung der Innendämmssysteme notwendig. Wann macht die Innendämmung keinen Sinn mehr? [12] [23] [24]

- Dämmung ist zu nass (feuchteabhängiger  $\lambda$ -Wert)
- Baustoffe werden zerstört (Frost-Tau-Wechsel)
- Baustoffe werden zerstört (Grenzwassergehalt)
- Baustoffe werden zerstört (Korrosion)
- Baustoffe werden zerstört (Holz und Holzwerkstoffe)]
- Auswaschen von chemisch erwünschten Stoffen
- Alterungsbeständigkeit / Langzeitbeständigkeit

## 5 Sensorloses Monitoring von Innendämmungen

Künftig soll eine Schadensfreiheit bei Innendämmssystemen auch ohne den Einbau von Sensoren garantiert werden können. Gemessen wird das Außenklima von einer oder mehreren zentralen Wetterstationen, die die Daten an eine Datenbank liefern, sowie das aktuelle Innenklima mit Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte über ein Hygrometer. (siehe „Abbildung 2“)

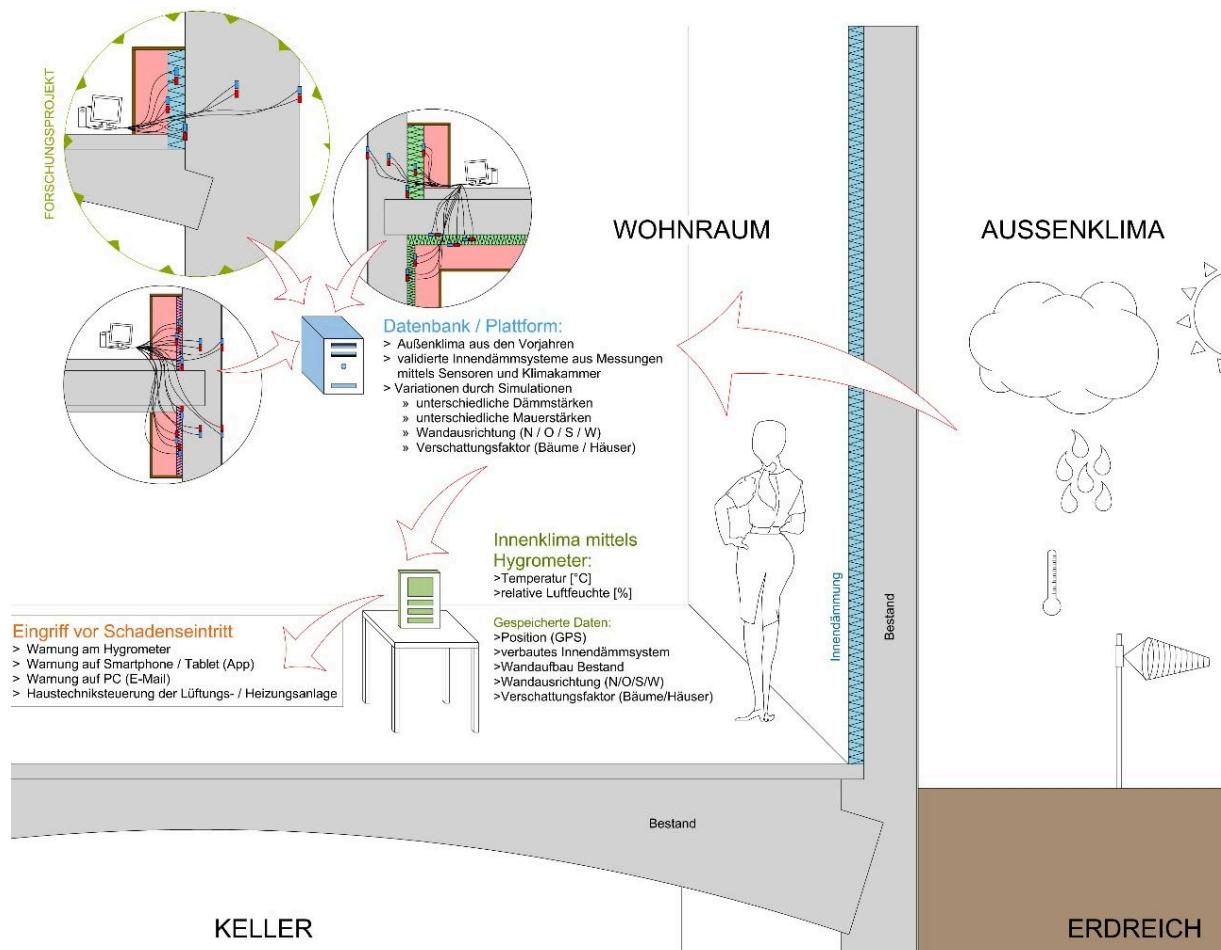


Abbildung 2: Schaubild sensorloses Monitoring

Dieses hat zusätzlich den Standort (GPS), das montierte Innendämmsystem, den Bestandsaufbau, die Orientierung der Wand nach der Himmelsrichtung und den Verschattungsfaktor (Bäume, Nachbargebäude...) gespeichert. Verschiedenste Innendämmsysteme sollen in Projekten wie in Kapitel 4 beschrieben professionell überwacht werden und parallelaufende hygrothermische Simulationen werden durch die Messdaten validiert. In weiteren Simulationen können nun Parameter wie Wand- oder Dämmstärken, Bauteilorientierungen oder Verschattungsfaktoren verändert werden, um weitere Datensätze zu erhalten ohne zusätzliche kostenintensive Messungen durchführen zu müssen. Über die Validierung mit den realen Messungen können diese Simulationsdaten verwendet werden, ohne Gefahr zu laufen, dass diese falsche Ergebnisse liefern. Alle gemessenen und simulierten Datensätze werden in einer Datenbank gespeichert und über einen W-LAN Zugang ruft das Hygrometer diese ab. Durch die Zusammenführung der verfügbaren Daten kann das smarte Hygrometer eine Versagenswahrscheinlichkeit prognostizieren und Eingriffe vor Schadenseintritt tätigen. Die Austrocknung eines anfallenden Kondensats im Bauteilinneren kann über die Mittelung der Außenklima aus den Vorjahren und der aktuell auftretenden Innenklimabedingungen für das individuell verbaute Innendämmsystem am Standort prognostiziert werden.

Als Maßnahmen vor Schadenseintritt können nun Warnungen am weitentwickelten Hygrometer selbst (vergleichbar mit einem Rauchwarnmelder – Blinksignal) erfolgen, Warnungen auf ein Smartphone oder ein Tablet mittels App getätigter werden oder ein E-Mail an eine eingespeicherte Adresse verschickt werden, um den Nutzer über notwendige gegensteuernde Maßnahmen zu informieren. In weiterer Folge wird das System selbst Eingriffe tätigen, die einen Bauschaden verhindern. So könnte die Lüftungsanlage und / oder die Heizung aktiviert werden um die Randbedingungen auf ein schadensfreies Niveau zu führen.

Der Innovationsgehalt und das Gesamtziel sind somit ein auf individuelle Randbedingungen einstellbares Dämmsystem, dass in Kombination mit einer Materialdatenbank und einem einfachen Steuerungsmodul Bauschäden zuverlässig vermeidet - leistbares Monitoring für den Individualfall.

## Literatur

- [1] Himpele K., Wien wächst, 2014, 1, Seite 112
- [2] Magistrat Graz – Präsidialabteilung, Bevölkerungsprognose 2015 – 2034 für die Landeshauptstadt Graz, 2015, 0026\_2014, Juli, Seite 12
- [3] Höland F., Schlick K., Zielmarktanalyse Energieeffizienz in der Altbausanierung Österreich, 2013, Seite 35
- [4] Land Steiermark, Die Zukunft des Wohnens, 2016, Seiten 14-16
- [5] Oberhuber A., Denk D., Zahlen, Daten, Fakten zu Wohnungspolitik und Wohnungswirtschaft in Österreich, 2014, Seite 88
- [6] Statistik Austria, Registerzählung 2011, erstellt am 04.12.2013, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/wohn\\_en/wohnungs\\_und\\_gebaeudebestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohn_en/wohnungs_und_gebaeudebestand/index.html); 08.02.2017 10:55 Uhr
- [7] Statistik Austria, erstellt am 01.03.2016 [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/bildu](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bildu)

- ng\_und\_kultur/kultur/baukulturelles\_erbe/020659.html; 08.02.2017 10:55 Uhr
- [8] Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung; Volkswirtschaftliche Effekte von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbarer Energien in den österreichischen Klima- und Energiemodellregionen, 2012, 2012/286-1/S/WIFO-Projektnummer: 1812, Seite 13
- [9] Statistik Austria, erstellt am 31.01.2017  
[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/wohn\\_en/wohnungs\\_und\\_gebaeudebestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohn_en/wohnungs_und_gebaeudebestand/index.html); 08.02.2017 10:55 Uhr
- [10] OIB 6 Berechnungsleitfaden - Energietechnisches Verhalten von Gebäuden, 2015
- [11] OIB 6 Energieeinsparung und Wärmeschutz, 2015
- [12] WTA-Merkblatt 6-2-14/D Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 2014
- [13] WTA- Merkblatt 6-8-16/D Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen –Vereinfachte Nachweise und Simulation, 2016
- [14] Stieldorf K., IDkonkret - Ganzheitliche Umsetzung des vorhandenen Wissens über Innendämmsysteme in die Praxis und deren gezielte Optimierung, <http://www.idkonkret.com/demonstrationsprojekte>, 13.01.2017 08:15 Uhr
- [15] Wegerer P., Nackler J. N., Bednar T., Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation made of Woodfibre Boards, Energy Procedia, 2015, 78, Seiten 1478-1483
- [16] Hengsberger H., Ruisinger U., Kautsch P., OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung, 2013
- [17] Ruisinger U., Petzold H., Grunewald J., Häupl P., Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat, Tagungsband Energiefachtagung der Landesregierung Thüringen, Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [18] Fröhlich B., Schaefer I., Leitfaden Innendämmung 2.0, Deutsche Bauzeitschrift DBZ, 2015, 2, Seiten 36-64
- [19] Geburtig G., Innendämmung im Bestand, Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 2010
- [20] Fachverband Innendämmung e. V., Praxis-Handbuch Innendämmung, Köln, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2016
- [21] Trimmel G., Bruckner N., Smole K., Paula M., KA 7 – Kaiserstraße: Innovative Sanierung eines denkmalgeschützten Gründerzeitgebäudes mit Innendämmung, 2014, 23
- [22] Steiner T., Huemer-Kals V., Thurner C., Heizinger F., Galosi A., Lipp B., Paula M., IDsolutions - Lösungen für die Sanierung mit Innendämmung im mehrgeschoßigen Gebäudebestand auf Ebene der Nutzungseinheit, 2014, 24
- [23] WTA Merkblatt 6-5-14/D Innendämmung nach WTA II - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren, 2014
- [24] ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz, 2003

## 4. Innendämmkongress

**19. bis 20. Mai 2017 in Dresden**

Es gibt viele Gründe, sich für eine Innendämmung zu entscheiden. Oft sind es Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden, die baulich nicht zu verändern sind. Es können auch konstruktive Parameter, wie z.B. ein geringer Dachüberstand oder eine zu geringe Distanz zur Grundstücksgrenze, dazu führen, eine Innendämmung zu wählen. Es kann auch sinnvoll sein, die Außenwände von der Raumluft thermisch abzukoppeln, um den Energieeinspareffekt zu erhöhen, indem man die Reduzierung der Transmissionswärmeströme durch intermittierenden Heizbetrieb unterstützt. Eine Innendämmung kann oft auch kostengünstiger und mit geringeren Beeinträchtigungen für die Nutzer während der Bauphase umgesetzt werden. Für alle diese Fälle gilt es, geeignete Sanierungslösungen zu finden, ohne die Funktion der Bestandskonstruktion zu beeinträchtigen. Auf der anderen Seite ist die Innendämmung bauphysikalisch anspruchsvoller. Fehler bei der Planung und Ausführung können dazu führen, dass Wärmebrücken, Schlagregen, Frost und Schimmel Probleme bereiten, die vermeidbar sind. Grundsätzlich sind Innendämmungen zuverlässig und sicher, wenn sie richtig ausgeführt werden. Die große Nachfrage nach Lösungen auf diesem Gebiet zeigt, dass Wissenstransfer weiterhin notwendig ist.

Der 4. Innendämmkongress vom 19. bis 20. Mai 2017 in Dresden ist organisiert vom Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden und der gemeinnützigen Bernhard Remmers Akademie.

Zentrales Thema des Kongresses ist der Einsatz von Innendämm-systemen in vorbildlich durchgeführten Sanierungsprojekten sowohl in der Praxis als auch in Wissenschaft und Forschung.

ISBN 978-3-8167-9975-7



9 783816 799757

bernhard remmers  
**Akademie**