

## Sanierung der Hohenzollern-Höfe:

# Monitoring & Simulation des Feuchtegehalts in Wandaufbau und Holzbalkenköpfen für vier verschiedene Innendämmsysteme



Im Auftrag der BASF Wohnen + Bauen GmbH

Endbericht Dezember 2015

**Autoren:**

Dr. Oliver Ottinger  
Dipl.-Ing. (BA) Kristin Bräunlich  
Dr. Berthold Kaufmann

**Unter Mitarbeit von:**

Dipl.-Ing. Søren Peper  
Dipl.-Ing. Henning Aust  
Dipl.-Ing. Eva Vahalova  
Dipl.-Ing. (FH) Florian Meffert  
Anneli Wagner

**Herausgeber:**

PASSIVHAUS INSTITUT  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstr. 44/46  
D-64283 Darmstadt  
Tel: 06151 / 82699-0  
Fax: 06151 / 82699-11  
E-Mail: mail@passiv.de  
www.passiv.de

**Darmstadt, Dezember 2015**

Titelbild: Straßenseitige Außenansicht der Hohenzollern-Höfe zu Beginn der Sanierungsarbeiten.

Dieses Projekt, bei dem gezeigt werden konnte, dass Innendämmung auch mit vereinfachten Luftdichtheitsanschlüssen funktionieren kann, wurde durch die Finanzierung der BASF Wohnen + Bauen GmbH (früher LUWOGGE) ermöglicht. Für die sehr engagierte und konstruktive Zusammenarbeit, die Grundvoraussetzung für das Gelingen eines solchen Projektes sind sei Herrn André Zaman ganz herzlich gedankt.

Ein weiterer Dank gilt dem Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, von dem wir die Wetterdaten der Wetterstation Mundenheim aus dem Luftmessnetz ZIEMEN erhalten haben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>GEBÄUDEKURZVORSTELLUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>ZIELSETZUNG UND UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND .....</b>	<b>6</b>
3.1	KRITISCHE PUNKTE BEIM EINSATZ VON INNENDÄMMUNG IM ZUSAMMENHANG MIT HOLZBALKENKÖPFEN	6
3.2	WANDAUFBAUTEN UND AUSFÜHRUNG DER ANSCHLÜSSE DER INNENDÄMMSYSTEME IN DEN HOHENZOLLERN HÖFEN.....	11
<b>4</b>	<b>THERMOGRAPHISCHE UNTERSUCHUNG UND BLOWERDOOR TEST .....</b>	<b>18</b>
4.1	INNENTHERMOGRAPHIE.....	19
4.2	BLOWERDOOR MESSUNG .....	30
<b>5</b>	<b>MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG DES WANDAUFBAUS UND DER HOLZBALKENKÖPFE .....</b>	<b>32</b>
5.1	MESSKONZEPT UND INSTALLIERTE MESSTECHNIK .....	32
5.2	ERGEBNISSE DER MESSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNG NACH VIER MESSJAHREN .....	36
<b>6</b>	<b>HYGROTHERMISCHE SIMULATION .....</b>	<b>42</b>
6.1	RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE HYGROTHERMISCHEN SIMULATIONEN DER ID-SYSTEME .....	44
6.2	DETAILLIERTER VERGLEICH VON MESSWERTEN UND SIMULATIONS-ERGEBNISSEN FÜR DIE WANDAUFBAUTEN .....	47
6.3	DETAILLIERTER VERGLEICH VON MESSWERTEN UND SIMULATIONS-ERGEBNISSEN FÜR DIE HOLZBALKENKÖPFE (2-D) IN DEN ERSTEN ZWEI WINTERN.....	52
6.4	VERGLEICH VON MESSUNG UND SIMULATION ÜBER DEN GESAMTEN MESSZEITRAUM .....	56
6.5	VERGLEICH DER ID-SYSTEME BEI IDENTISCHEN INNENRANDBEDINGUNGEN .....	61
6.6	ZUSAMMENFASSUNG .....	64
<b>7</b>	<b>BEWERTUNG DER DÄMMSYSTEME NACH WIRTSCHAFTLICHEN GESICHTSPUNKTEN.....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>ABLEITUNG VON PLANUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR VERGLEICHBARE SANIERUNGSMAßNAHMEN .....</b>	<b>68</b>

# 1 Einleitung und Zusammenfassung

Die Wohnanlage Hohenzollern-Höfe mit rund 180 Wohnungen wurde ab 2010 umfassend modernisiert. Bauherr ist die BASF Wohnen + Bauen GmbH. Die straßenseitigen Fassaden im neobarocken Stil konnten aus Gründen des Ensembleschutzes nicht mit einem Wärmedämmverbundsystem ausgestattet werden. Daher kam zur Reduktion des Heizwärmebedarfs und zur Verbesserung des Wohnkomforts nur eine Innendämmung in Frage. Die vorhandene Holzbalkenkonstruktion stellt im Zusammenhang mit Innendämmung eine besondere Herausforderung dar: Die Ausführung der luftdichten Anschlüsse ist besonders aufwändig. Gleichzeitig weisen Balkenköpfe eine hohe Feuchteempfindlichkeit auf.

Für die Hohenzollern-Höfe sollte ein Verfahren ohne komplette Freilegung und Abdichtung der einzelnen Balken zum Einsatz kommen. Die luftdichten Anschlüsse wurden hier durch Dichtklebeband zu allen einbindenden Wänden, Decken und Böden hergestellt. Im ersten Bauabschnitt wurde dieses Vorgehen versuchsweise auf vier verschiedene Dämmsysteme angewandt. Als deutlich entschärfende Maßnahme wurden von außen ein neuer wasserabweisender Putz sowie darunter ein 20 mm dicker Dämmputz angebracht.

Zur Überprüfung der Qualität der luftdichten Anschlüsse der Innendämmsysteme, wurde vom Passivhaus Institut (PHI) eine Unterdruckthermografie-Untersuchung durchgeführt. Verbleibende Leckagen der luftdichten Anschlüsse hätten so als 'cold-spots' an den Innenoberflächen der Dämmsysteme sichtbar werden müssen. Die Aufnahmen zeigten jedoch keine lokalen oder flächigen Temperaturabsenkungen, was für eine gute Umsetzung der luftdichten Anschlüsse der Innendämmung spricht.

Zur Untersuchung des Einflusses der Innendämmung auf die Holzbalkenkonstruktion führte das Passivhaus Institut ein umfangreiches Monitoring über 4 Jahre durch. Untersucht wurden unter anderem die Temperaturen und Holzfeuchten in den Balkenköpfen sowie die Temperaturen und die Ausgleichsfeuchten im Mauerwerk und hinter der Dämmebene.

Die gemessenen Holzfeuchten wiesen über den gesamten Messzeitraum unkritische Werte von maximal 18 Massen-% auf. Die Ausgleichsfeuchten hinter den Dämmebenen im kalten Bereich zeigten teils große Unterschiede für die verschiedenen Dämmsysteme. Für eine belastbarere Bewertung der unterschiedlichen Entwicklungen der Ausgleichsfeuchten, wurde neben der messtechnischen Untersuchung der Dämmsysteme vom PHI eine hygrothermische Untersuchung – rechnerische Simulation des Temperatur- und Feuchteverlaufs im Bauteil und Vergleich mit der Messung – durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Unterschiede der Ausgleichsfeuchten weniger durch die Dämmsysteme selber, sondern viel mehr von den

unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in den angrenzenden Räumen verursacht wurden. Es wurden sowohl ein- als auch zweidimensionale hygrothermische Berechnungen durchgeführt und die Rechenergebnisse jeweils mit den gemessenen Werten verglichen. Dabei konnte durch eine Parameteranpassung eine sehr gute Übereinstimmung für die ungestörten Wandaufbauten erzielt werden. Auch für die Balkenköpfe stimmten die Feuchtelevel aus Messung und Simulation im Wesentlichen überein.

Aus der messtechnischen Untersuchung und den begleitenden Simulationen kann gefolgert werden, dass bei diesem Bauvorhaben alle vier Dämmsysteme sehr gut funktionieren haben. Sowohl die Holzfeuchten waren durchweg im sicheren Bereich unter 18 M% als auch die Feuchtelevel in den Wandkonstruktionen waren unkritisch. Es haben sich auch keine Hinweise darauf ergeben, dass durch Konvektion erhöhte Feuchten auftraten. Der vereinfachte luftdichte Anschluss – Andichtung der Innendämmkonstruktion an die Decken, Fußboden- sowie Innenwandaufbauten mit Butylklebeband – hat hier also funktioniert.

Folgende Faktoren wirkten sich dabei allerdings begünstigend auf die Feuchteentwicklung in allen Wandaufbauten und insbesondere in den Balkenköpfen aus:

- Anbringung eines neuen, wasserabweisenden Außenputzes
- Anbringung eines - wenn auch nur dünnen - Dämmputzes von außen
- Installation von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die gerade im Winter für reduzierte Luftfeuchten im Innenraum führen
- Heizungsleitungen wurden horizontal entlang der Außenwände gelegt, so dass die Temperatur entlang der Balkenköpfe etwas erhöht wurde
- Ein Estrichboden bildet jeweils den oberen raumseitigen Abschluss einer Holzbalkendecke, was auf vergleichsweise einfache Weise, einen guten luftdichten Anschluss an die Außenwandkonstruktion ermöglichte.

## 2 Gebäudekurzvorstellung

Die Wohnanlage Hohenzollern-Höfe mit rund 180 Wohnungen wurde im Jahr 1923 für Angestellte der BASF in Ludwigshafen am Rhein erbaut. Die Wohnsiedlung besteht aus insgesamt über 20 Mehrfamilienhäusern in Blockrandbebauung. Im Zweiten Weltkrieg wurden rund 20 % der Gebäude zerstört und danach wieder aufgebaut. Ab 2010 wurde die gesamte Anlage gebäudeweise umfangreich saniert. Ein wichtiges Ziel der Arbeiten war die wärmeschutztechnische Verbesserung mit dem Ziel der Reduktion der Heizkosten sowie der damit verbundenen Treibhausgasemissionen und der Verbesserung des thermischen Komforts. Durch eine Vielzahl an Einzelmaßnahmen sollte der Heizwärmebedarf von 180 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf unter 45 kWh/(m<sup>2</sup>a) reduziert werden.



**Abbildung 1: Straßenseitige Außenansicht der Hohenzollern-Höfe zu Beginn der Sanierungsarbeiten (links) und nach Fertigstellung der Baumaßnahmen (rechts).**

Zur Hofinnenseite (vgl. Abbildung 2) wurde ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus EPS in einer Stärke von 20 cm angebracht und neue, energetisch hochwertige Fenster installiert. Die straßenseitigen Fassaden im neobarocken Stil konnten aus Gründen des Ensembleschutzes, nicht mit einem WDVS ausgestattet werden. Aus diesem Grund blieb nur der Einsatz einer Innendämmung, um den Wärmeschutz auch hier deutlich zu verbessern. Die innenseitige Anbringung des Wärmeschutzes ist allerdings bauphysikalisch deutlich anspruchsvoller. Neben den Außenwänden wurden auch die Kellerdecke unterseitig sowie die oberste Geschossdecke von oben mit jeweils 20 cm EPS gedämmt. [Lerch2011]

Die Wärmeerzeugung für Heizung und Trinkwasser wurde auf Fernwärme umgestellt. Ferner wurden die Wohnungen mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) ausgestattet. Das Lüftungskonzept wurde dezentral umgesetzt, d.h. jede Wohnung erhielt ein eigenes Lüftungsgerät.



**Abbildung 2:** Außenansicht von der Innenhofseite, über die der Hauptzugang zu den Wohnungen erfolgt. Hier konnte ein außenseitiges Wärmedämmverbundsystem angebracht und Balkone vorgesetzt werden.

### 3 Zielsetzung und Untersuchungsgegenstand

Innendämmung ist vielfach und auch langjährig bewährt, es muss aber sowohl bei der Planung als auch bei der Umsetzung mit erhöhter Sorgfalt gearbeitet werden. Die besondere Schwierigkeit bei der Anwendung von Innendämmmaßnahmen bei diesem Projekt besteht darin, dass das Gebäude gemäß der damals häufig anzutreffenden Konstruktion mit Holzbalkendecken ausgestattet ist. Hierdurch ergeben sich gleich zwei erschwerende Punkte: Zum einen sind Holzbalkenköpfe, die aus organischem Material bestehen, besonders anfällig für Schäden aufgrund von hohen Feuchtegehalten, zum anderen erschweren die Holzbalkenköpfe die Ausbildung einer innenseitigen luftdichten Ebene, da sie diese durchstoßen. Die Erhöhung der Luftdichtheit eines Gebäudes ist prinzipiell eine wichtige Energieeinsparmaßnahme, da hierdurch die Infiltrationsverluste minimiert werden. Darüber hinaus trägt die Luftdichtheit maßgeblich zum Schutz der Baukonstruktion bei. Ungewollte Luftströme von innen nach außen und damit mögliche Kondensation in der Baukonstruktion, wird auf diese Weise vermieden. Dies ist besonders wichtig im Zusammenhang mit Innendämmung. Leckagen sind hier besonders gefährlich, weil die Dämmebene mit feucht warmer Raumluft hinterströmt werden kann und die Baukonstruktion hinter der Dämmebene durch Auffeuchtung gefährdet wäre (s. dazu auch Abschnitt 3.1).

Statt der generell empfehlenswerten, aber sehr aufwändigen Methode der Andichtung der einzelnen Balken an die luftdichte Ebene kam in diesem Projekt ein auf die spezifischen Randbedingungen abgestimmtes vereinfachtes Verfahren zur Ausbildung der luftdichten Ebene zum Einsatz. Wäre dies allgemein anwendbar, so könnte in Zukunft einer der aufwändigsten Arbeitsschritte bei der Innendämmung im Zusammenhang mit Holzbalkendecken deutlich vereinfacht werden.

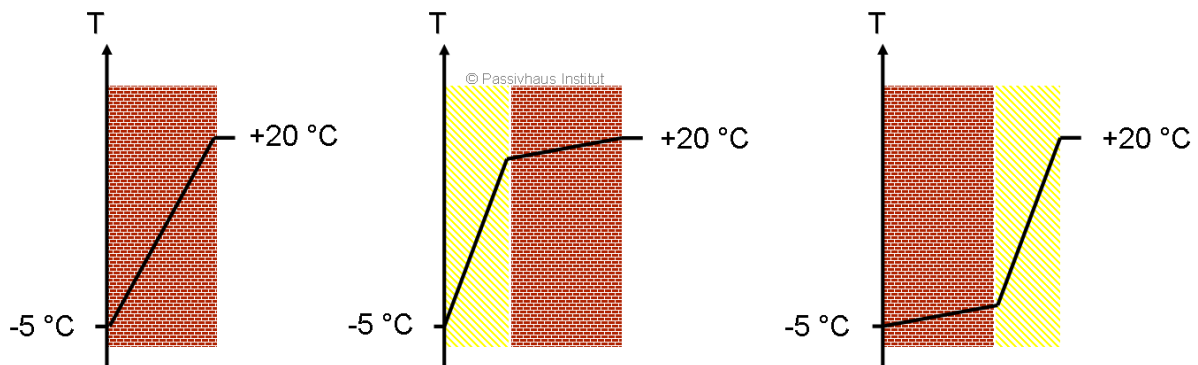
Im ersten Bauabschnitt (dem Gebäude Fichtestraße 20) wurden unterschiedliche Dämmsysteme installiert, welche im Rahmen eines Monitorings messtechnisch untersucht wurden. Dabei wurden die Bauteilfeuchte der Wandaufbauten sowie insbesondere auch die der Holzbalkenköpfe erfasst. Aus den Messungen sollte zum einen eine Aussage zur Praxistauglichkeit des vereinfachten luftdichten Anschlusses abgeleitet werden. Zum anderen wird eine Bewertung bzw. Vergleich der Dämmsysteme unter den vorliegenden Randbedingungen ermöglicht.

#### 3.1 Kritische Punkte beim Einsatz von Innendämmung im Zusammenhang mit Holzbalkenköpfen

Eine Dämmung auf der Innenseite der Fassade führt im Gegensatz zu einer außen-seitigen Dämmung zur Absenkung der Temperatur im Winter hinter der Dämmung im



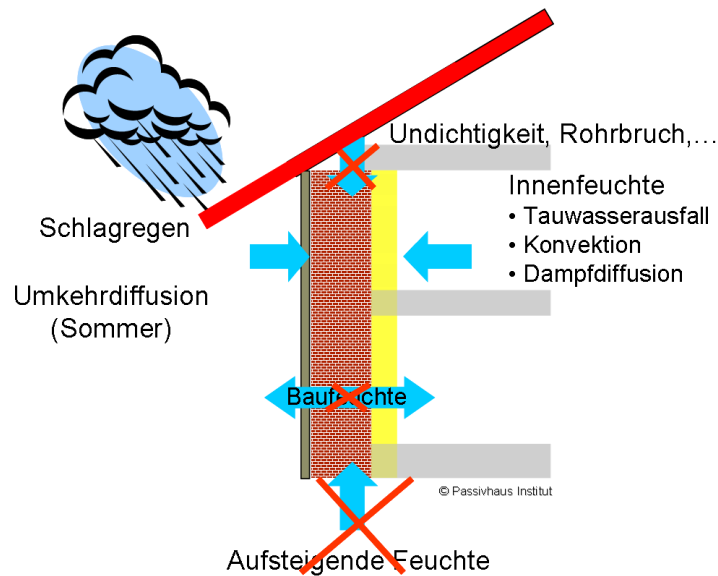
Mauerwerk (vgl. Abbildung 3). Niedrigere Temperaturen haben bei gleichem absolutem Feuchtegehalt eine höhere relative Feuchte zur Folge<sup>1</sup>. Des Weiteren besteht bei geringeren Temperaturen im Bauteil ein reduziertes Trocknungspotential des Mauerwerks. Eine Innendämmung hat daher tendenziell immer erhöhte Feuchtegehalte in der Baukonstruktion zur Folge, weshalb beim Einsatz von Innendämmung mögliche Gefahren durch erhöhte Feuchte immer in Betracht gezogen werden sollten und die Planung und Ausführung entsprechend gewissenhaft erfolgen müssen.



**Abbildung 3: Unterschiedliche Temperaturverläufe in einer ungedämmten sowie einer von außen und von innen gedämmten Außenwand bei winterlichen Temperaturen.**

Auf Grund des reduzierten Trocknungspotentials im Wandaufbau sind Feuchteinträge besonders gering zu halten. Mögliche Feuchtequellen für eine Außenwand mit Innendämmung sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Von außen ist besonders der **Schlagregen** zu nennen. Dabei handelt es sich um den Anteil des Niederschlags, der durch starken Wind verursacht, horizontal auf die Außenwand fällt. Eine Reduktion der Schlagregenbelastung kann durch den Dachüberstand bewirkt werden. Schlagregen an sich ist allerdings noch kein Problem. Denn wäre die Außenoberfläche perfekt wasserabweisend, könnte kein Wasser in die Konstruktion eindringen. Je nach Zustand der Außenoberfläche kann der Schlagregen allerdings die mit Abstand größte Feuchtequelle für den Wandaufbau sein. Dies gilt besonders bei rissigem Mauerwerk oder stark wassersaugenden Außenputzen. Im Fall der Hohenzollern-Höfe ist die Regenbelastung an sich eher gering, da Ludwigshafen der Schlagregengruppe II (Skala I-III) zugeordnet werden kann. Außerdem wurde ein neuer wasserabweisender Außenputz aufgebracht, so dass in Zukunft nur sehr geringe Mengen Feuchtigkeit von außen in die Konstruktion eindringen sollten.

<sup>1</sup> Die Feuchte innerhalb von Materialien (z.B. Wandaufbauten) wird üblicherweise entweder als Wassergehalt pro Volumen oder als Ausgleichsfeuchte (relative Feuchte [%]) angegeben. Die Ausgleichsfeuchte ist die relative Luftfeuchte, die sich bei Kontakt einer Materialprobe zu einem kleinen Luftvolumen einstellen würde. Im Bereich moderater Feuchten, wie sie hier gemessen wurden, ist die Angabe der relativen Feuchte anschaulicher und wird daher verwendet. Bei sehr hohen Feuchtegehalten ist dagegen die Angabe des Wassergehalts in kg bzw. m<sup>3</sup> pro Volumen sinnvoller.



**Abbildung 4: Mögliche Feuchtequellen für eine Außenwand mit Innendämmung**

Die Umkehrdiffusion spielt im deutschen Klima eine eher untergeordnete Rolle. Feuchtequellen in der Wand könnten durch **aufsteigende Feuchte** oder Undichtigkeiten in Rohrleitungen etc. erzeugt werden. Diese sollten vor Einbau der Innendämmung auf jeden Fall ausgeschlossen werden. Zusätzliche **Baufeuchte** wird durch das feuchte Aufbringen der Innendämmung z.B. mit Mörtelkleber eingebracht und kann ggf. nur langsam austrocknen. Dies ist in den Messergebnissen z.B. für IQ-Therm deutlich sichtbar. Das Einbringen von neuer Feuchte bei der Installation der Innendämmung sollte daher so gering wie möglich gehalten werden. Wenn der Feuchteeintrag während der Installationsphase nicht verhindert werden kann, so sollte die Austrocknung so gut wie möglich begünstigt werden. Eine geeignete Maßnahme für diffusionsoffene Systeme ist z.B. das unterstützte Austrocknen nach Innen durch Bautrockner.

Des Weiteren gibt es drei mögliche Prozesse, durch welche **Innenfeuchte** in die Wand eingebracht werden kann:

- Tauwasserausfall
- Dampfdiffusion
- Konvektion aufgrund von Hinterströmung der Dämmung

**Tauwasserausfall** durch zu geringe Innenoberflächentemperaturen sollte durch eine durchgehend gute Dämmung ausgeschlossen werden. Hier ist ein besonderes Augenmerk auf Wärmebrücken z.B. an Fensteranschlüssen zu legen. So ist die Dämmung der Fensterlaibungen ein essentieller Punkt. Aber auch einbindende Innenwände oder Decken bilden Wärmebrücken, die durch Flankendämmung deutlich entschärft werden können [AkkP32].

Der Feuchtetransport von Wasserdampf durch **Diffusion** wird maßgeblich durch den Diffusionswiderstand  $\mu$  des Dämmstoffs bestimmt. Es handelt sich dabei um eine dimensionslose Größe, die angibt, wie viel größer der Diffusionsstrom im Vergleich zu ruhender Luft ist. Für das Gesamtsystem ist der sd-Wert ausschlaggebend, der die wasserdampfdiffusionsäquivalente Dicke zu einer ruhende Luftschicht ( $sd = \mu \cdot d$ , Dicke  $d$ ) beschreibt. In diesem Projekt wurden Systeme eingesetzt, die relativ niedrige sd-Werte aufweisen. Die Dämmsysteme erfüllen mit sd-Werten (Gesamtsystem) zwischen 0,6 m und 1,9 m zwar nicht die strenge Definition von „diffusionsoffen“ nach DIN 4108-3 ( $sd \leq 0,5$  m), sind aber dennoch vergleichsweise diffusionsoffen. Diffusionsoffene Systeme haben im Gegensatz zu diffusionsdichten Systemen, die meist mit Dampfbremsen arbeiten, den Vorteil, dass Feuchtigkeit nach innen wieder austrocknen kann. Dies ist besonders bei nennenswerter Schlagregenbelastung von Vorteil.

#### **Kriterien für feuchtetechnisch unkritische Innendämmung**

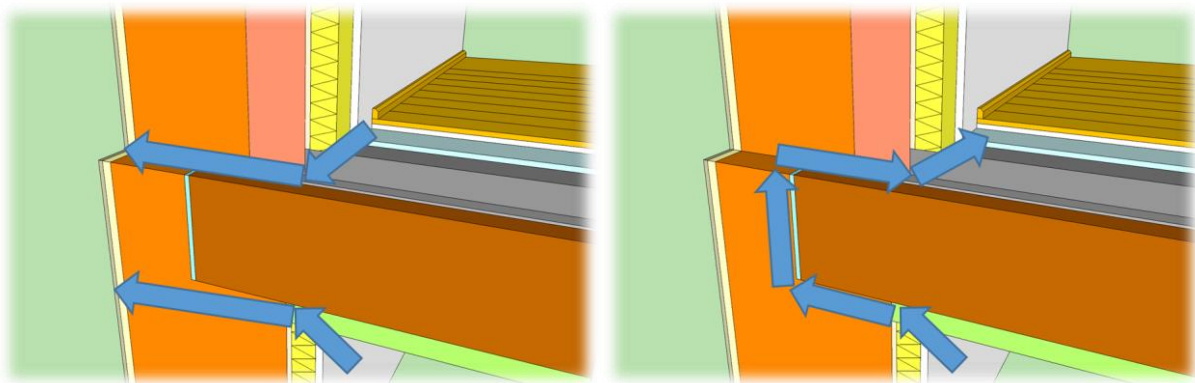
- Kein Schimmelrisiko auf der raumseitigen Oberfläche (Voraussetzung ist die Einhaltung einer minimalen Oberflächentemperatur).
- Kein Schimmelwachstum innerhalb des Wandaufbaus (kritischster Punkt: Hinter der Dämmebene in der alten Putzebene). Bewertung z.B. mit Isoplethenmodell nach [Sedlbauer2001].
- Gesamtwassergehalt der Konstruktion darf nicht dauerhaft zunehmen (Dauerhafte Auffeuchtung).
- Ausschluss von Frostgefährdungen im Bereich der alten Putzebene. Daraus lässt sich ableiten, dass die Feuchten im hygroskopischen Bereich (<95% rel H im Porenlufttraum) liegen müssen.

Für eine Innendämmung ist es unerlässlich, dass raumseitig eine luftdichte Ebene geschaffen wird, die sicher verhindert, dass die Dämmebene mit feuchtwarmer Raumluft **hinterströmt** wird. Für die Regelfläche folgt hieraus, dass Fugenzwischenräume zwischen Dämmplatten vermieden werden sollten. Gleiches gilt für Hohlräume hinter der Dämmebene. Bei aufzuklebenden Dämmsystemen ist daher eine vollflächige Verklebung bzw. das Wulst-Punkt-Verfahren anzuwenden.

Nahezu ausgeschlossen werden können Hohlräume hinter der Dämmung beim Einsatz des Dämmputzes, da dieser direkt auf die Bestandswand aufgetragen wird. Ein besonderes Augenmerk sollte stets auf den **Anschlüssen des Dämmsystems an Wände, Böden und Decken** liegen. Insbesondere die **Anschlüsse an die Balkenköpfe von Holzbalkendecken** stellen einen kritischen Punkt dar, da sie zum einen

eine Durchdringung der luftdichten Ebene darstellen und zum anderen bei langfristig zu hohen Bauteilfeuchten die Gefahr von Fäulnis besteht, was wiederum die statische Funktion gefährden kann. Als konservativer Grenzwert wird für Holz in DIN 68800-2 ein Grenzwert von 20 M% angegeben. Dieser Wert ist, wie z.B. von Kehl et al. [Kehl2013] belegt, für die detaillierte Beschreibung von Risiken für Pilzwachstum nicht hinreichend genau. Es wurden temperaturabhängige Wachstumsmodelle vorgeschlagen, die das Risiko bei hohen Feuchtelasten beschreiben und die strikte Grenze von 20 M% Holzfeuchte deutlich nach oben erweitern. Da, wie im Abschnitt 5.2.1 berichtet wird, die Holzfeuchten während der Messung stets deutlich unter 20 M% lagen, wird hier auf das detailliertere Modell nicht näher eingegangen. Der Hinweis darauf soll lediglich verdeutlichen, dass zeitweise auch höhere Holzfeuchten akzeptabel wären.

Die potentiellen Leckagepfade bei unzureichender Luftdichtheit der Holzbalkenkonstruktion sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Luftströme können hier entweder von innen entlang des Balkens direkt nach außen gehen (s. Abbildung 5 links) bzw. zwischen zwei Geschossen um den Balken herum verlaufen, wie in der Abbildung rechts angedeutet ist. Die erste Variante ist mittels einer Überdruckmessung messtechnisch nachweisbar wohingegen die zweite Variante messtechnisch kaum zugänglich ist. Eine theoretische Betrachtung des Einflusses von Luftleckagen an Holzbalkenköpfen wurde von Janetti [Janetti2014] durchgeführt.



**Abbildung 5:** Mögliche Pfade von Luftströmen um einen Balkenkopf nach der Dämmmaßnahme: Strömung von feuchter, warmer Luft von innen entlang des Balkens nach außen (links) und vom Untergeschoss um den Balken herum zum Obergeschoss (rechts). Die Luft kühlt außerhalb der Dämmebene deutlich ab, so dass hier die Gefahr der Kondensatbildung besteht.

Die sicherste derzeit bekannte Methode, Holzbalkendecken bei Innendämmungsmaßnahmen raumseitig luftdicht anzuschließen ist es, jeden einzelnen Balken(kopf) aufwändig komplett frei zu legen und mit einem sorgfältig angedichteten 'Kragen' (z.B. Folie verklebt mit Bitumendickbeschichtung) an die luftdichte Ebene des Wand-Innendämmsystems anzudichten. Liegen große Risse vor, so kann auch das Aufbohren der

Risse und Einbringen von Dichtmasse notwendig sein. Weitere Informationen zu diesem Thema können z.B. in dem Projektbericht [Peper 2014 oder Hasper 2010] gefunden werden.

Die raumseitige Feuchtelast ist, unabhängig vom Feuchtetransport, stark abhängig von der Raumlufffeuchte. Daher ist prinzipiell eine niedrige Raumlufffeuchte anzustreben. So kann durch den Einsatz einer kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung in den besonders kritischen Wintermonaten für eine konstant niedrige Raumlufffeuchte gesorgt und damit das Risiko der Auffeuchtung von Innen deutlich reduziert werden. Der Einbau einer mechanischen dauernd betriebenen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG), die einen notwendigen Mindestluftwechsel sicherstellt, ist damit nicht nur aus energetischen thermischen und hygienischen Gründen sinnvoll sondern auch aus bauphysikalischer Sicht. Für weitergehende Informationen zum Thema Innendämmung wird [AkkP32] empfohlen.

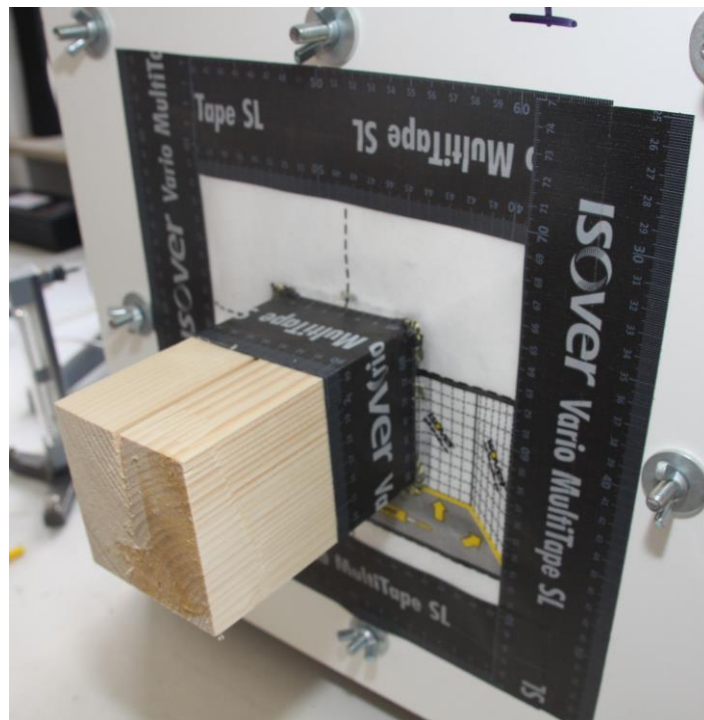


Abbildung 6: Holz balken mit Dichtkragen in einer Messeinrichtung [Peper 2014].

### 3.2 Wandaufbauten und Ausführung der Anschlüsse der Innendämmsysteme in den Hohenzollern Höfen

Die untersuchte straßenseitige Außenwand besteht aus einem ca. 38 cm dicken, Mauerwerk mit darin einbindenden Holzbalkendecken. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei dem Mauerstein um Kalksandstein und bei den Holzbalken um Fichtenholz handelt [Bode 2010]. Aufgrund des Ensembleschutzes war die Anbringung eines WDVS nicht möglich. Es konnten aber immerhin sehr eingeschränkt Maßnahmen an der Außenfassade durchgeführt werden, welche sich auf die Auftragung eines 20 mm

dicken Dämmputzes (Heck Wall Systems, WLG 070) in Verbindung mit einem 10 mm dicken wasserabweisenden Außenputzes (HECK K+A PLUS, Heck Wall Systems) beschränkten. Die Gefahr der Auffeuchtung in der Wandkonstruktion und speziell den Balkenköpfen wird durch die wenn auch nur dünne äußere Dämmschicht bereits in zweierlei Hinsicht reduziert: Zum einen wird durch die Dämmwirkung die Temperatur am Balkenkopf erhöht und damit das Trocknungspotential gegenüber der Variante ohne äußeren Dämmputz erhöht. Zum anderen führt der neu aufgebrachte wasserabweisende Außenputz zur Reduktion der Schlagregenaufnahme.

Im ersten Bauabschnitt (Fichtestraße 20) wurden unterschiedliche Dämmsystemvarianten installiert, um in einem umfangreichen Monitoring den Einfluss der jeweiligen Innendämmmaßnahme auf die Bauteilfeuchten des Wandaufbaus und der Holzbalkenköpfe zu untersuchen. Dazu wurden jeweils in übereinander liegenden Räumen die gleichen Innendämmsysteme installiert (vgl. farbliche Markierung in Abbildung 7), damit auch die Einflüsse auf die Holzbalken von oben und von unten jeweils vom gleichen Dämmsystem ausgehen.



**Abbildung 7:** Fassadenansicht mit den vier unterschiedlich farbig gekennzeichneten Innendämmvarianten von links: Heck-Dämmputz, IQ-Therm-Dämmplatte, Polystyrol-Hartschaumplatte, Heck-Dämmplatte

Folgende Innendämmsysteme kamen zum Einsatz entsprechend der aufgeführten innenseitigen Aufbauten:

### **Heck-Dämmputz EPS 60 mm WLG 070**

Der HECK DP EPS (Dämmputz EPS) ist ein Spezialputz nach DIN V 18 550, welcher aufgrund des hohen Anteils spezieller leichter Zuschlagstoffe dämmende Eigenschaften aufweist. Er eignet sich als Außen- und Innenputz auf allen üblichen mineralischen Wandbaustoffen, insbesondere auch auf zerklüftetem Mauerwerk. In diesem Projekt wurde der Dämmputz auf der Innenseite in zwei Lagen aufgebracht, um eine Durchtrocknung zu ermöglichen (Reduktion der eingebrachten Baufeuchte durch die Dämmmaßnahme).

- 60 mm Heck-Dämmputz EPS WLG 070
- 10 mm Kalkzementmörtel (HECK K+A PLUS, luftdichte Ebene)



**Abbildung 8:** Heck-Dämmputz nach Anbringung der ersten Schicht (links), schematische Darstellung (rechts) Quelle: BASF

### **IQ- Therm-Dämmplatte 50 mm WLG 031**

Bei der IQ-Therm-Dämmplatte der Firma Remmers handelt es sich um PUR Hartschaumplatten mit regelmäßigen, senkrecht zur Oberfläche stehenden Lochungen, welche mit Dochten aus kapillar leitendem, mineralischem Material, gefüllt sind.

- 15 mm IQ-Fix-Kleber
- 50 mm IQ-Therm-Dämmplatte WLG 031
- 15 mm Innenputz IQ-Top (luftdichte Ebene)



Abbildung 9: IQ-Therm-Dämmplatte nach Anbringung (links), schematische Darstellung (rechts) Quelle: Remmers

### Polystyrol-Hartschaumplatte „Knauf Therm“ WLG 032

Die Verbundplatte InTherm der Firma Knauf besteht aus einer Gipsplatte und einer Dämmstoffschicht aus EPS ( $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$ ). Raumseitig wurde eine zweite Gipskartonplatte quer zur Verlegerichtung der InTherm-Platten aufgebracht.

- 20 mm Luftraum mit Mörtelbatzen
- 40 mm Polystyrol Hartschaumplatten WLG 032
- 2x12,5 mm Gipskarton Platte (luftdichte Ebene)



Abbildung 10: Polystyrol-Hartschaumplatte InTherm von Knauf nach Anbringung (links), schematische Darstellung (rechts) Quelle: Knauf



### Heck-Dämmplatte 50 mm WLG 042

Die HECK Innendämmplatte MS ist eine kapillaraktive mineralische Dämmplatte auf natürlicher Basis (ohne Faser- oder Kunststoffzusätze).

- 15 mm Heck Sanierkleber (HECK-K+A RENO)
- 50 mm Heck-Dämmplatte MS WLG 042
- 5 mm mineralische Spachtelung (HECK K+A PLUS, luftdichte Ebene)



Abbildung 11: Heck-Innendämmplatte nach Anbringung (links), schematische Darstellung (rechts) Quelle: BASF

Durch die Aufbringung der Dämmsysteme stellt sich eine Reduktion des U-Wertes von über 1,7 W/(m<sup>2</sup>K) auf Werte zwischen 0,442 und 0,582 W/(m<sup>2</sup>K) ein (vgl. Abbildung 12). Die Wärmeverluste durch die reguläre Fläche reduzieren sich entsprechend um mehr als zwei Drittel für den Dämmputz bis zu 75 % für das iQ-Therm-System.

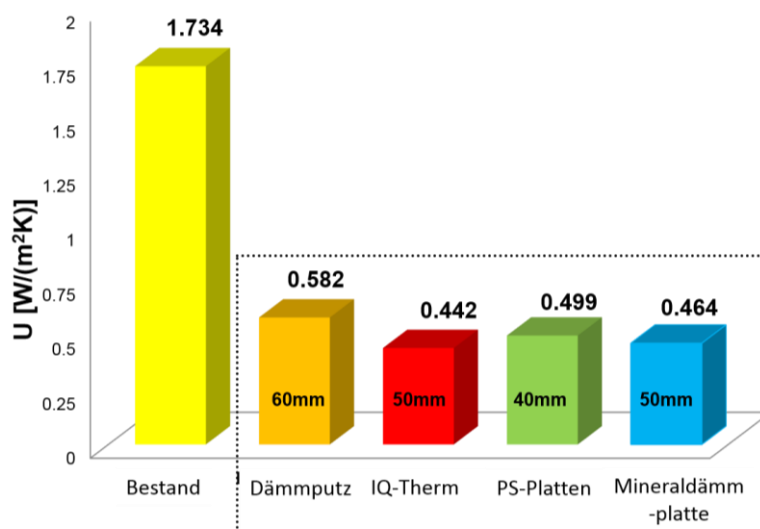


Abbildung 12: U-Werte der Bestandskonstruktion sowie der vier Innendämmsysteme.

## Der vereinfachte luftdichte Anschluss

Bei der Ausbildung der luftdichten Ebene wurde anstelle der vollständigen Freilegung und Andichtung jedes einzelnen Balkens (wie in Abbildung 6 dargestellt) ein auf die spezifischen Randbedingungen abgestimmtes vereinfachtes Luftdichtheitskonzept umgesetzt. Die Idee dabei ist, die luftdichten Ebenen der Außenwand und die des Bodens (Estrich) sowie der einbindenden Innenwände oder der Decke direkt zu verbinden. Damit wird die luftdichte Ebene quasi in den Innenraum hinein gezogen.

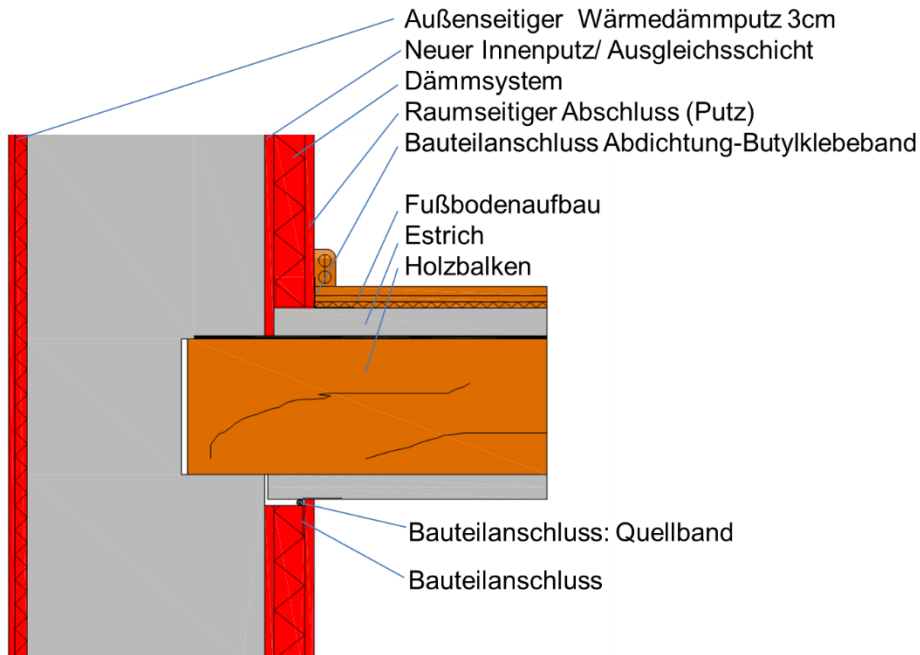
Bei der Umsetzung wurde zunächst der Innenputz abgetragen und auch der Estrichboden in einem Streifen von ca. 0,5 m zur Außenwand hin entfernt. Dadurch wurden sowohl Putz als auch Estrich in dem kritischen Bereich des Balkenanschlusses erneuert. Außerdem war somit die Möglichkeit gegeben den Zustand der Balken zu beurteilen und bei Bedarf einzelne Balken komplett freizulegen und auszutauschen. Dies ist absolut notwendig, da zum einen Beschädigungen der Balken durch in der Vergangenheit liegende irreguläre Ereignisse (z.B. Rohrbrüche) verursacht sein könnten. Zum anderen ist hierdurch ein Vergleich zwischen realem Zustand der Balken und Ergebnissen aus eventuell durchgeführten Simulationen des Feuchtehaushalts des Wandaufbaus möglich. Sollten hier größere Diskrepanzen zwischen den Vorhersagen aus den Simulationen für die Bestandskonstruktion und dem Zustand der Balken auftreten, wäre dies ein wichtiger Hinweis auf eventuelle Abweichungen bei den Eingangs-Materialparametern für die Simulationen.



**Abbildung 13: Innenansicht der Außenwand mit abgetragenem Innenputz sowie freigelegten Holzbalkenenden**

Nach Ausführung der Dämmarbeiten wurde die luftdichte Ebene des Dämmsystems durch Butylklebeband an den Zementestrich des Bodens sowie an den Deckenputz und die einbindenden Innenwände angeschlossen. Da die luftdichten Ebenen dadurch weit in den Raum hinein gezogen werden, haben mögliche Undichtigkeiten an den Balkenköpfen einen deutlich reduzierten Einfluss. Luftströmungen über Nebenwege, d.h. über nicht ausreichend luftdicht angeschlossene einbindende Innenwände, die

entlang der Deckenbalken zur Außenwand auftreten können, sind allerdings nicht völlig ausgeschlossen. Das Risiko ist allerdings dadurch beschränkt, dass hier Estrichböden vorliegen, die an sich luftdicht sind. Bei undichten Dielenböden, unter denen sich Luft ungehindert bewegen kann wäre dies nicht möglich. Unter den hier gegebenen Randbedingungen (neuer Außenputz, Estrichboden etc.) war der gewählte vereinfachte luftdichte Anschluss vertretbar.



**Abbildung 14: Schematische Darstellung des Wandaufbaus und des luftdichten Anschlusses der Innendämmsysteme an Estrich und Decke**

Die Aufgabe des Passivhaus Instituts war es, die Funktionsfähigkeit dieser vereinfachten luftdichten Anschlüsse messtechnisch zu überwachen. Dazu wurde zunächst nach der Installation eine Unterdruckthermographie-Messung (s. Kapitel 4) durchgeführt. Hierbei sollten lokale größere Leckagen in der luftdichten Ebene erkannt werden. Hierdurch konnte allerdings nicht völlig ausgeschlossen werden, dass bedingt durch mögliche andere Faktoren (vgl. Abschnitt 3.1) die Feuchtigkeit in den Balkenköpfen ansteigt. Daher wurde durch ein umfangreiches Monitoring mit zahlreichen Temperatur- und Feuchtesensoren die Entwicklung des Feuchtegehalts hinter den vier verschiedenen Dämmsystemen sowie in den Holzbalkenköpfen verfolgt (s. dazu auch Kapitel 5). Mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen (s. dazu auch Kapitel 6) sollte dann durch Vergleich mit den Messungen evaluiert werden, ob das System bauphysikalisch unkritisch ist oder ob es zu einer allmählichen Auffeuchtung in der Konstruktion kommt.

## 4 Thermographische Untersuchung und Blowerdoor Test

Zur Überprüfung der luftdichten Anschlüsse der unterschiedlichen Innendämmsysteme an der Holzbalkendecke wurde am 29.02.2012 eine thermografische Untersuchung durchgeführt. Dazu wurden die Außenwand und die Übergänge zur Holzbalkendecke und den Innenwänden von innen mit einer hochauflösenden Thermografiekamera auf Schwachstellen hin untersucht. Im nächsten Schritt wurde im gesamten Haus wie bei einem Luftdichtheitstest mit einer Blower-Door-Apparatur Unterdruck von 50 Pa erzeugt und die Wand dabei und danach weiter mit der Wärmebildkamera betrachtet.

Die thermografische Untersuchung von innen wurde zwischen 9:15 Uhr und 10:00 Uhr durchgeführt. Anschließend, ab 10:30 erfolgte eine erneute Untersuchung während der Unterdruckerzeugung im Gebäude. Am Untersuchungstag betrug in der Zeit der Innenthermografie (ohne Unterdruck) die mittlere Außenlufttemperatur 8,6°C. Während der Unterdruckthermografie stieg die Außenlufttemperatur auf bis zu 9,5°C. Die Temperaturmessung erfolgte mit einem externen Datenlogger vor Ort. Die maximale Globalstrahlung im Zeitraum der Untersuchung war mit durchschnittlich 259 W/m<sup>2</sup> gering, auch gab es keine Niederschläge im Zeitraum der Messung. Die Witterungsbedingungen waren durch verhältnismäßig hohe Außenlufttemperatur nicht ganz ideal, jedoch günstig genug um mit der hochauflösenden Thermografie-Kamera Unregelmäßigkeiten zu erkennen.

Die thermographischen Aufnahmen wurden mit dem hochauflösenden Thermographiesystem „VARIOSCAN high resolution“ der Firma Jenoptik (Jena) erstellt. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm „IRBIS+ V2.2“ der Firma InfraTec GmbH (Dresden) verwendet.

**Tabelle 1: Randbedingungen der thermographischen Untersuchung**

Außentemperatur Vortag 28.02.2012 (Mittelwert)	8,5°C
Außentemperatur 29.02.2012 Mittelwert 9:15 – 13:15 Uhr	9,6°C
Niederschlag [Zimen]	kein Niederschlag
rel. Luftfeuchte (Mittelwert 7:00 bis 10:00 Uhr)	72 %
<b>Gebäude</b>	teilweise bewohnt aber vollständig beheizt

Tabelle 2: Geräteparameter des verwendeten Thermographie-Systems

Geräteparameter des Thermographie-Systems	
Messgerät	VARIOSCAN 3021 ST, Fa. Jenoptik
Spektralbereich ( $\mu\text{m}$ )	8 bis 12
Aufnahmesystem	Scansystem
Detektormaterial	HgCdTe
Temperaturaufösung bei 30°C (K)	$\pm 0,03$
Bildformat (Pixel)	360 x 240

## 4.1 Innenthermographie

Untersuchungsgegenstand war die straßenseitige Außenwand im 1. OG. Die Wände in den Räumen waren großteils frei einzusehen. Es wurde von jedem Dämmsystem mindestens eine Innenthermografie aufgenommen. Nach der Untersuchung des Ausgangszustandes wurde die Wohnung unter Unterdruckbedingungen gesetzt (Druckdifferenz gegenüber Außen: 50 Pa). Hierfür wurde das Überdruck-Messgerät in die hofseitige Eingangstür eingesetzt und die Wohnungstüren wurden geöffnet. Während dieser Zeit wurde mit der Wärmebildkamera die Dämmsysteme mit gleicher Kameraeinstellung und –Aufstellung nochmals untersucht.

Nachfolgend werden dämmsystemweise die Ausgangsthermografiebilder sowie die Thermografiebilder nach der Erzeugung des Unterdrucks im Gebäude gezeigt und erläutert.

## Dämmsystem: Heckdämmputz



Abbildung 15: 1.OG Wohnung links/ letztes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: Heck-Dämmputz

Die Thermografieaufnahme zeigt die Innenansicht auf das Dämmsystem Heck-Dämmputz im 1. OG im Ausgangszustand. Die Darstellung wurde aus mehreren Einzelaufnahmen in einheitlicher Temperaturskala zusammengesetzt. Zu Beginn der Innenaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur 20,3°C.

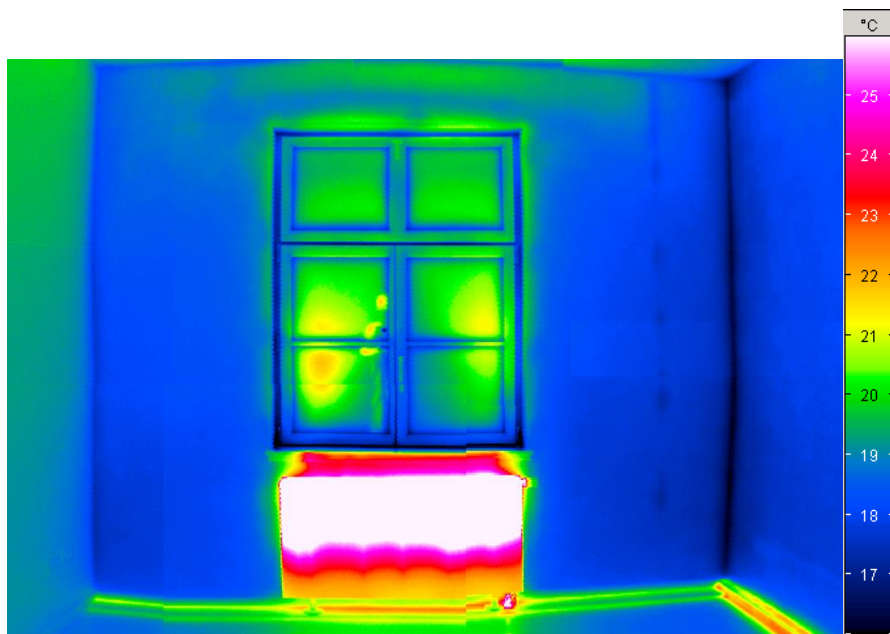


Abbildung 16: 1.OG Wohnung links/ letztes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: Heck-Dämmputz, Thermografie

Als Wärmequelle durch höhere Oberflächentemperaturen deutlich zu erkennen ist der Heizkörper unter dem Fenster so wie die im Fußbodenaufbau entlang der Außenwand und rechten Innenwand verlegten Heizleitungen. Die Schwachstellen der Innendämmkonstruktion sind als Wärmebrücke mit niedrigeren Oberflächentemperaturen allerdings auch deutlich zu sehen: im Bereich der einbindenden Innenwände sowie in der Fensterlaibung.

Die Wandfläche mit Innendämmung zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung. Die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand beträgt  $17,8^{\circ}\text{C}$ . An den Rändern mit einbindenden Innenwänden sowie der einbindenden Decken ist eine etwas niedrigere Temperatur zu erkennen. Die Differenz beträgt ca.  $1,2\text{ K}$  gegenüber der ungestörten Wand. Die gemessene minimale Oberflächentemperatur im Übergang zur einbindenden Innenwand beträgt bei diesen Außentemperaturbedingungen  $16,1^{\circ}\text{C}$  und ist damit für diese Außenluftbedingungen vergleichsweise gering. Bei niedrigen Außenluftbedingungen könnten die feuchtetechnisch kritische Oberflächentemperatur ( $12,8^{\circ}\text{C}$  bei  $50\%$  r.F.) zeitweise unterschritten werden.

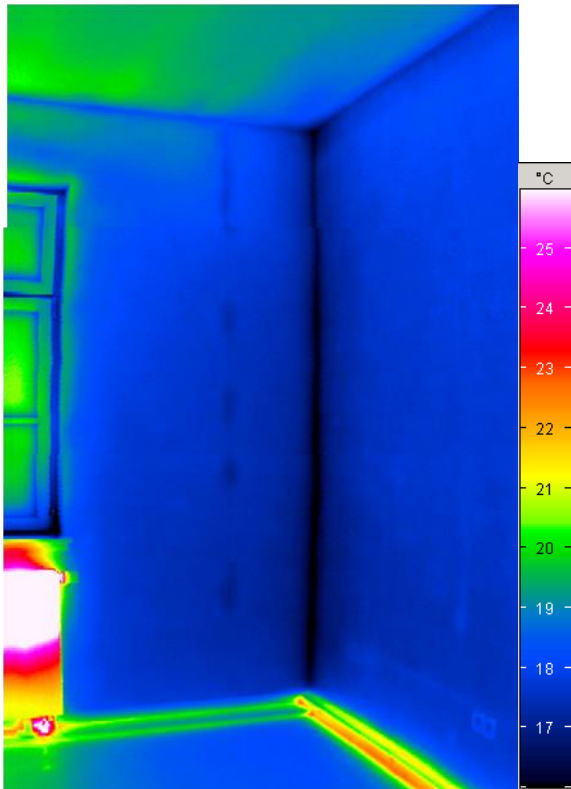
Mit einer Begleitdämmung der einbindenden Innenwände könnte die Oberflächentemperatur in den Ecken angehoben werden und damit die Gefahr der Unterschreitung kritischer Oberflächenfeuchten auch bei winterlichen Extremtemperaturen ausgeschlossen werden.

Die niedrigsten Oberflächentemperaturen werden im Bereich des Fensters festgestellt. Unten rechts in der Fensterlaibung werden minimal  $14,9^{\circ}\text{C}$  gemessen. An dieser Stelle kann bei niedrigerer Außentemperatur durchaus die kritische Oberflächentemperatur von  $12,8^{\circ}\text{C}$  (ab der bei einer Raumlufffeuchte von  $50\%$  Oberflächenfeuchten  $\geq 80\%$  auftreten können) unterschritten werden.

Durch einen optimierten Fenstereinbau sowie eine verstärkte Dämmung in der Fensterlaibung können die Oberflächentemperaturen in diesen Bereichen angehoben werden, was die Gefahr kritischer Oberflächenfeuchten deutlich verringert.

### Unterdruck Bedingungen

Die Unterdruckthermografie zum Dämmsystem Heck-Dämmputzes ist in Abbildung 17 dargestellt. Zu Beginn der Unterdruckthermografieaufnahmen betrug die Raumlufftemperatur noch immer  $20,3^{\circ}\text{C}$ .



**Abbildung 17: 1.OG Wohnung links/ letztes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: Heck-Dämmputz, Unterdruckthermografie**

Sowohl die ungestörten Oberflächen als auch die Temperaturen in den Kanten und Ecken der einbindenden Innenwände sowie der Fensterlaibung sind sehr gleichmäßig um 0,4 bzw. 0,2 K gesunken. Mit 17,4°C liegt die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand um 0,4 C unter dem Ausgangswert.

In den Rändern zu den einbindenden Innenwänden sind auch nach der Unterdruckthermografie niedrigere Temperaturen im Vergleich zur ungestörten Wand zu erkennen. Die Temperaturdifferenz der durchschnittlichen Temperatur am Übergang zur einbindenden Innenwand zur durchschnittlichen Temperatur der ungestörten Wand hat sich mit 1 K gegenüber dem Temperaturverhältnis des Ausgangszustandes geringfügig verringert.



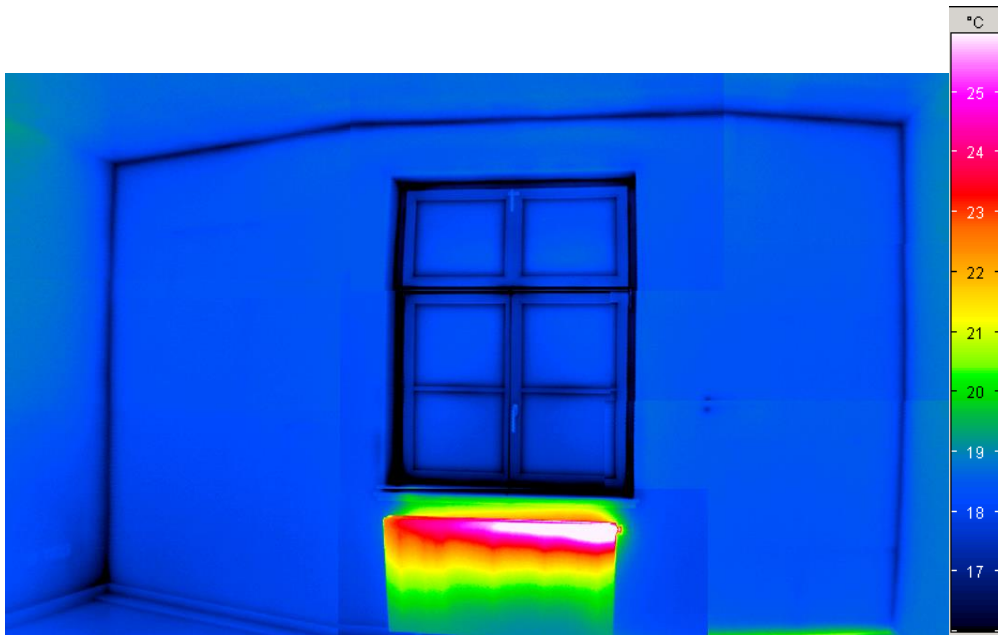
## Dämmsystem: IQ-Therm-Dämmplatte



**Abbildung 18: 1.OG Wohnung links/ erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: IQ-Therm-Dämmplatte**

Die Thermografieaufnahme zeigt die Innenansicht auf das Dämmsystem IQ-Therm im 1. OG im Ausgangszustand. Die Darstellung wurde aus mehreren Einzelaufnahmen in einheitlicher Temperaturskala zusammengesetzt. Zu Beginn der Innenaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur  $20,2^{\circ}\text{C}$ .

Die Wandfläche mit Innendämmung zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung. Die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand beträgt  $18,3^{\circ}\text{C}$ . An den Rändern mit einbindenden Innenwänden sowie der einbindenden Decken ist eine etwas niedrigere Temperatur zu erkennen. Die Differenz beträgt ca.  $0,8\text{ K}$  gegenüber der ungestörten Wand. Die gemessene minimale Oberflächentemperatur im Übergang zur einbindenden Innenwand beträgt bei diesen Außentemperaturbedingungen  $15,5\text{ C}$  (Ecke unten links im Thermografiebild). Bei niedrigeren Außenlufttemperaturen könnte es hier zur Unterschreitung der Grenztemperatur ( $12,8^{\circ}\text{C}$  bei 50% rF) kommen.



**Abbildung 19: 1.OG Wohnung links, erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: IQ-Therm-Dämmplatte, Thermografie**

Mit einer Begleitdämmung der einbindenden Innenwände könnte die Oberflächentemperatur in den Ecken angehoben werden und damit die Gefahr der Unterschreitung kritischer Oberflächenfeuchten auch bei winterlichen Extremtemperaturen ausgeschlossen werden.

Die niedrigsten Oberflächentemperaturen werden im Bereich des Fensters festgestellt. Unten links in der Fensterlaibung werden minimal  $13,8^{\circ}\text{C}$  gemessen. An dieser Stelle kann bei niedrigerer Außentemperatur durchaus die kritische Oberflächentemperatur von  $12,8^{\circ}\text{C}$  (unterhalb der bei einer Raumluftfeuchte von 50% Oberflächenfeuchten über 80% auftreten) unterschritten werden.

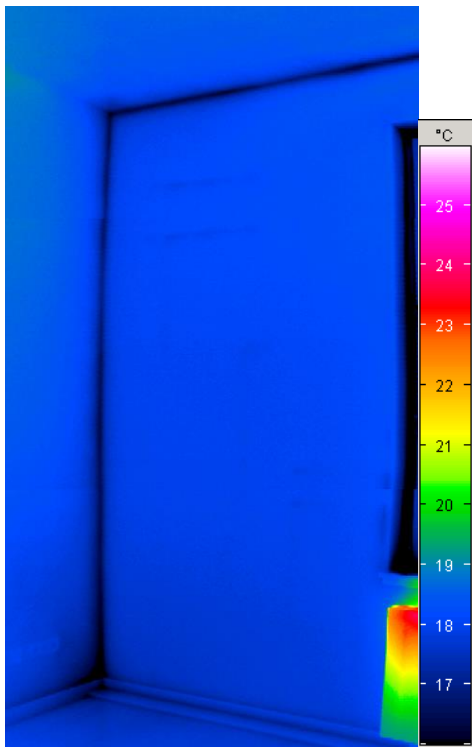
Durch einen optimierten Fenstereinbau sowie eine verstärkte Dämmung in der Fensterlaibung können die Oberflächentemperaturen in diesen Bereichen angehoben werden, was die Gefahr kritischer Oberflächenfeuchten deutlich verringert.

### Unterdruck Bedingungen

Die Unterdruckthermografie zum Dämmsystem IQ-Therm ist in Abbildung 20 dargestellt. Zu Beginn der Unterdruckthermografieaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur  $20,2^{\circ}\text{C}$ .

Sowohl die ungestörten Oberflächen als auch die Temperaturen in den Kanten und Ecken der einbindenden Innenwände sind sehr gleichmäßig um 0,2 bzw. 0,3 K gesunken. Mit  $17,2^{\circ}\text{C}$  liegt die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand um  $0,2^{\circ}\text{C}$  unter dem Ausgangswert.

In den Rändern zu den einbindenden Innenwänden sind auch nach der Unterdruckthermografie niedrigere Temperaturen im Vergleich zur ungestörten Wand zu erkennen. Die Temperaturdifferenz der durchschnittlichen Temperatur am Übergang zur einbindenden Innenwand zur durchschnittlichen Temperatur der ungestörten Wand ist mit 0,9 K nahezu konstant geblieben



**Abbildung 20: 1.OG Wohnung links/ erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: IQ-Therm-Dämmplatte, Unterdruckthermografie**

## Dämmsystem: PS Hartschaumplatte



Abbildung 21: 1.OG Wohnung rechts/ erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: PS-Hartschaumplatte

Die Thermografieaufnahme zeigt die Innenansicht auf das Dämmsystem PS-Hartschaumplatte im 1. OG im Ausgangszustand. Die Darstellung wurde aus mehreren Einzelaufnahmen in einheitlicher Temperaturskala zusammengesetzt. Zu Beginn der Innenaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur 21,4°C.

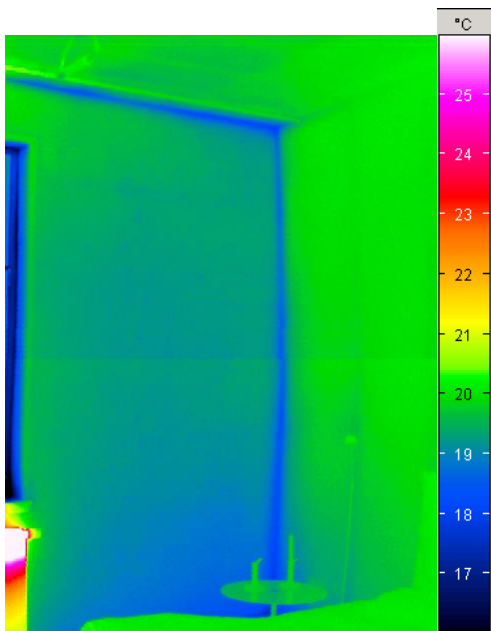
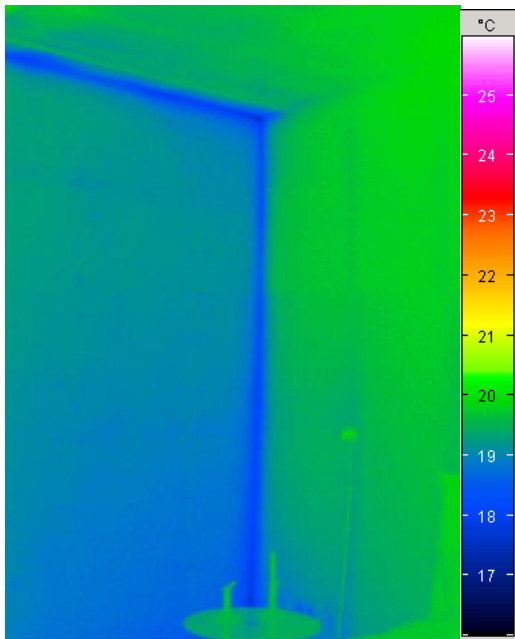


Abbildung 22: 1.OG Wohnung rechts/ erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: PS-Hartschaumplatte, Thermografie

Die Wandfläche mit Innendämmung zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung. Die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand beträgt  $19,2^{\circ}\text{C}$ . An den Rändern mit einbindenden Innenwänden sowie der einbindenden Decken ist eine geringfügig niedrigere Temperatur zu erkennen. Die Differenz beträgt ca.  $0,4\text{ K}$  gegenüber der ungestörten Wand. Die gemessene minimale Oberflächentemperatur im Übergang zur einbindenden Innenwand beträgt bei diesen Außentemperaturbedingungen  $17,7^{\circ}\text{C}$ . Diese Temperaturwerte stellen feuchtetechnisch keine kritischen Bedingungen dar ( $12,8^{\circ}\text{C}$  bei  $50\%$  rF). Auch bei niedrigeren Außentemperaturen ist hier keine Unterschreitung der feuchtetechnisch kritischen Temperatur zu erwarten.

### Unterdruck Bedingungen

Die Unterdruckthermografie zum Dämmsystem PS-Hartschaumplatte ist in Abbildung 23 dargestellt. Zu Beginn der Unterdruckthermografieaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur  $21,3^{\circ}\text{C}$ .



**Abbildung 23: 1.OG Wohnung rechts/ erstes Zimmer straßenseitig, Dämmsystem: PS-Hartschaumplatte, Unterdruckthermografie**

Sowohl die ungestörten Oberflächen als auch die Temperaturen in den Kanten und Ecken der einbindenden Innenwände sind sehr gleichmäßig um  $0,1\text{ K}$  gesunken. Mit  $18,7^{\circ}\text{C}$  liegt die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand um  $0,1\text{ C}$  unter dem Ausgangswert. In den Rändern zu den einbindenden Innenwänden sind auch nach der Unterdruckthermografie niedrigere Temperaturen im Vergleich zur ungestörten Wand zu erkennen. Die Temperaturdifferenz der durchschnittlichen Temperatur am Übergang zur einbindenden Innenwand zur durchschnittlichen Temperatur der ungestörten Wand ist mit  $0,4\text{ K}$  konstant geblieben.

## Dämmsystem: Heckdämmplatte



Abbildung 24: 1.OG Wohnung rechts, Wohnküche, Dämmsystem: Heckdämmplatte

Die Thermografieaufnahme zeigt die Innenansicht auf das Dämmsystem Heckdämmplatte im 1. OG im Ausgangszustand. Die Darstellung wurde aus mehreren Einzelaufnahmen in einheitlicher Temperaturskala zusammengesetzt. Zu Beginn der Innenaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur 21,8°C.

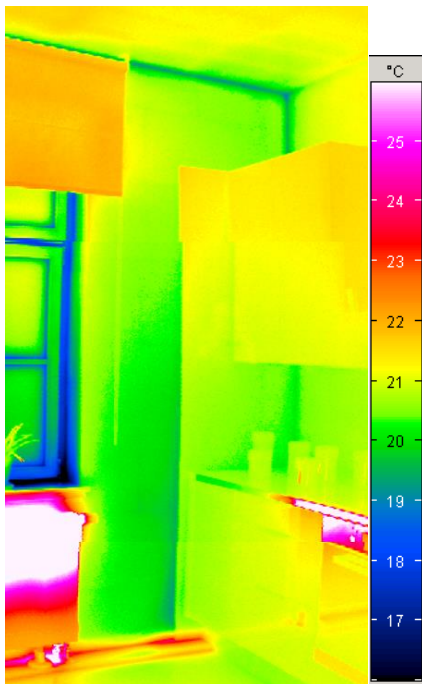


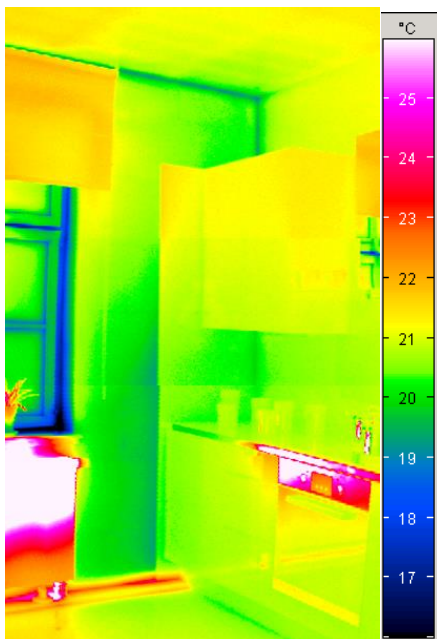
Abbildung 25: 1.OG Wohnung rechts, Wohnküche, Dämmsystem: Heckdämmplatte, Thermografie

Die Wandfläche mit Innendämmung zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung. Die durchschnittliche Temperatur der ungestörten Wand beträgt  $20,4^{\circ}\text{C}$ . An den Rändern mit einbindenden Innenwänden sowie der einbindenden Decken ist eine etwas niedrigere Temperatur zu erkennen. Die Differenz beträgt ca.  $0,5\text{ K}$  gegenüber der ungestörten Wand. Die gemessene minimale Oberflächentemperatur im Übergang zur einbindenden Innenwand beträgt bei diesen Außentemperaturbedingungen  $19,0\text{ C}$ . Diese Temperaturwerte stellen feuchtetechnisch keine kritischen Bedingungen dar ( $12,8^{\circ}\text{C}$  bei  $50\% \text{ rF}$ ), jedoch war hier ein Großteil des Übergangs zur einbindenden Innenwand vom Küchenschrank verstellt und dadurch mit der Thermografiekamera nicht erfassbar.

### Unterdruck Bedingungen

Die Unterdruckthermografie zum Dämmsystem Heckdämmplatte ist in Abbildung 26 dargestellt. Zu Beginn der Unterdruckthermografieaufnahmen betrug die Raumlufttemperatur  $21,8^{\circ}\text{C}$ .

Sowohl die ungestörten Oberflächen als auch die Temperaturen in den Kanten und Ecken der einbindenden Innenwände sind in etwa konstant geblieben.



**Abbildung 26: 1.OG Wohnung rechts, Wohnküche, Dämmsystem: Heckdämmplatte, Unterdruckthermografie**

## **Zusammenfassung der Innenthermografien und Unterdruckthermografie**

Bei allen Thermografieaufnahmen wurde die jeweils tiefste Temperatur im Bereich der Fensterlaibung festgestellt. An dieser Stelle kann bei niedrigerer Außentemperatur durchaus die kritische Oberflächentemperatur von 12,8°C (ab der bei einer Raumluftfeuchte von 50% Oberflächenfeuchten  $\geq 80\%$  auftreten können) unterschritten werden.

Durch einen optimierten Fenstereinbau sowie eine verstärkte Dämmung in der Fensterlaibung können die Oberflächentemperaturen in diesen Bereichen angehoben werden, was die Gefahr kritischer Oberflächenfeuchten deutlich minimiert.

Niedrige Oberflächentemperaturen wurden vor allem auch in den Übergängen zu den einbindenden Innenwänden festgestellt. Bei niedrigeren Außenluftbedingungen könnte es hier vor allem beim Innendämmsystem Heckdämmputz und IQ-Therm-Dämmplatte zu kritischen Oberflächentemperaturen kommen, welche erhöhte Oberflächenfeuchten zur Folge hätten. Mit einer Begleitdämmung der einbindenden Innenwände könnte die Oberflächentemperatur in den Ecken angehoben werden und damit die Gefahr erhöhter Oberflächenfeuchten stark minimiert werden.

Da in diesem Gebäude eine Lüftungsanlage betrieben wird, liegt die mittlere Raumluftfeuchte in unkritischen Größenordnungen, was das Risiko von Schimmelwachstum deutlich reduziert.

Nach den Thermografieaufnahmen wurde das Gebäude in Unterdruck versetzt und eine erneut Thermografieaufnahmen aufgenommen. Das Hauptziel der Untersuchung war es, neben der Kontrolle der Oberflächentemperaturen, zu prüfen ob Schwachstellen durch mangelhafte Luftdichtheit vorhanden sind. Diese würden zur lokalen oder auch flächigen Temperaturabsenkung führen. Die Aufnahmen zeigen diesbezüglich keinerlei Mängel, die Konstruktion ist gut ausgeführt worden.

Zum Zeitpunkt der Thermografieaufnahmen betrug die mittlere Außenlufttemperatur 8,6°C. Durch die vergleichsweise hohen Außenlufttemperaturen war die Beeinflussung der Außenwand durch die Außentemperatur geringer als bei vergleichbaren Untersuchungen.

## **4.2 Blowerdoor Messung**

Zur Feststellung der Gebäudeluftdichtheit wurde nach Abschluss der thermographischen Untersuchung eine vollständige Luftdichtheitsmessung des gesamten Gebäudes durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Messung war ein Teil der Wohnungen schon bewohnt. Die Blowerdoor-Einrichtung wurde hierfür in die hofseitige Haustür eingebaut. Die Lüftungsanlagen (eine Lüftungsanlage je Wohneinheit) waren ausgeschaltet





und die Außenluft- und Fortluftführung wurde jeweils über das Lüftungsgerät luftdicht verschlossen.

Die Messung umfasst eine Unter- und eine Überdruckmessreihe bei unterschiedlichen Druckstufen. Folgende Luftdichtheitswerte wurden für einen Differenzdruck von 50 Pa erzielt:

- 1. Unterdruckmessung Nutzungszustand: 2,1 1/h
- Überdruckmessung Nutzungszustand: etwa 3,9 1/h
- 2. Unterdruckmessung nach Abdichten der vier Türen zum nicht-ausgebauten Dachgeschoss und der Kellertür: 1,5 1/h

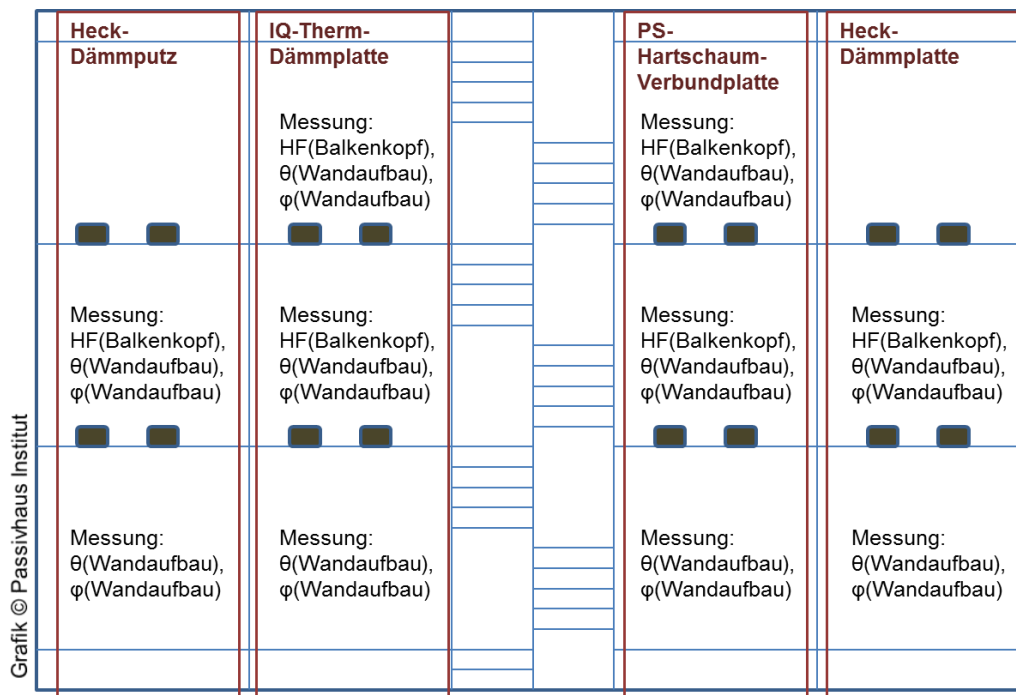
Während der ersten Unterdruck-Messreihe wurden hohe Leckageströme im Bereich der Türen zum nicht-ausgebauten Dachgeschoss festgestellt. Nach dem Abkleben der vier Türen im Dachgeschoss sowie der Kellertür wurde die Unterdruckmessung wiederholt. Die Ergebnisse waren mit 1,5 1/h deutlich besser, was die starken Leckagen im Bereich der Türen bestätigte.

Die Türen wurden nach diesem Ergebnis seitens des Auftraggebers abgedichtet und somit die Leckagen und Wärmeverluste zum nicht-ausgebauten Dachgeschoss minimiert.

## 5 Messtechnische Untersuchung des Wandaufbaus und der Holzbalkenköpfe

### 5.1 Messkonzept und installierte Messtechnik

In einem umfangreichen Monitoring wurde der Einfluss der unterschiedlichen Dämmsysteme auf die Bauteilfeuchten im Wandaufbau sowie in den Balkenköpfen untersucht. Die Aufteilung der Messpunkte auf die unterschiedlichen Dämmsysteme sowie im Gebäude verdeutlicht die folgende Abbildung 27.



**Abbildung 27: Schematische Darstellung des Messkonzepts für die vier Dämmsystemen und die Messungen in den Etagen: Holzfeuchtemessung im Balkenkopf (HF), Temperaturmessung im Wandaufbau ( $\theta$ ), Messung der Ausgleichsfeuchte im Wandaufbau ( $\varphi$ ).**

Zur Berücksichtigung der Einflüsse der Innenraumbedingungen auf die Entwicklung der Bauteilfeuchten, wurden die Temperaturen und relativen Feuchten der jeweils an die zu untersuchenden Wandaufbauten angrenzenden Räume ebenfalls messtechnisch erfasst.

Zusätzlich wurden über eine auf dem Dach des Nachbargebäudes installierte Wetterstation die Wetterdaten (Temperatur, Feuchte, Globalstrahlung, Wind & Niederschlag) aufgezeichnet. Zwei Niederschlagssensoren an der Fassade erfassten darüber hinaus die Niederschlagsmenge direkt an der Fassade. Die Wetterdaten wurden mit dem Ziel aufgezeichnet, die lokalen Wetterbedingungen bei der Auswertung der Messdaten sowie der späteren hygrothermischen Simulation berücksichtigen zu können.

### 5.1.1 Positionen der Messstellen im Wandaufbau

Für das Monitoring wurden Temperatur- und Feuchtesensoren in den Wandaufbau an verschiedenen Positionen installiert (Darstellung in Abbildung 28):

- im Mauerwerk nah an der Außenoberfläche / Außenputz
- in der alten Innenputzebene zwischen Mauerwerk und Dämmsystem,
- an der Oberfläche der neuen Innenwand (nur Temperatur),
- in den Holzbalkenköpfen am äußeren unteren Ende und
- im Innenraum.

Die Messung der einzelnen Parameter wird in folgenden Abschnitten näher erläutert. Eine tabellarische Übersicht über die installierte Messtechnik mit Angabe der Messgenauigkeiten befindet sich in Anhang 1.

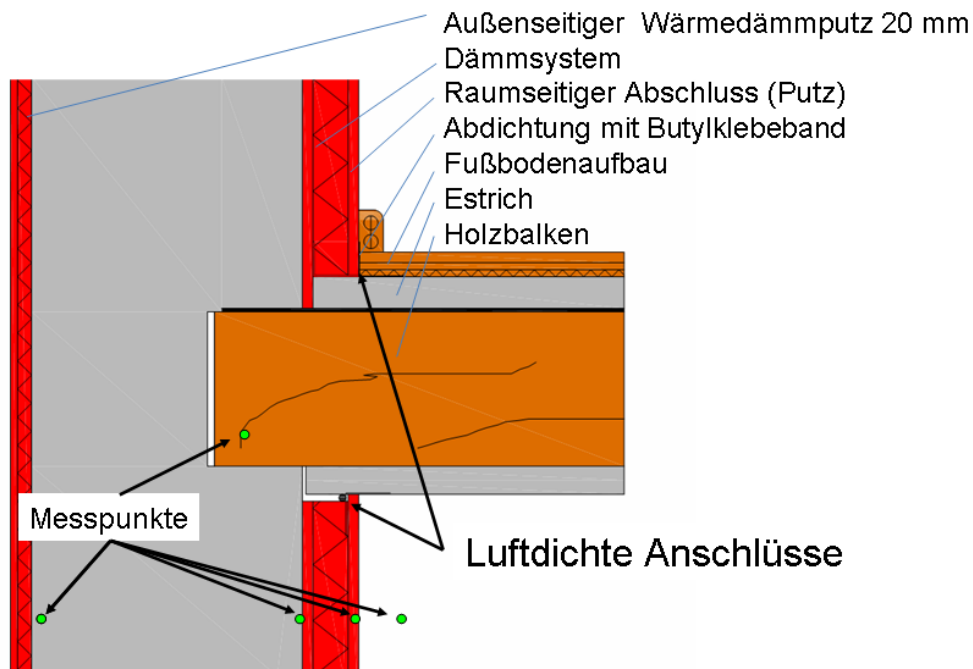


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Wandaufbaus und der installierten Feuchte- und Temperatursensoren (Messpunkte).

### 5.1.2 Messung der Holzfeuchte

Die Holzfeuchtemessung erfolgt mit Hilfe einer hochohmigen Widerstandsmessung (s. auch [Reising 2009]) der Firma Fuva. Die Sensoren werden dabei durch Metallnägeln gebildet, welche über eine Bohrhilfe (s. Abbildung 29, links) im entsprechenden Winkel bis in die Holzbalkenköpfe eingebracht wurden. Zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses ist jede Messstelle zusätzlich mit einem Temperatursensor KTY der Firma Fuva ausgestattet.



**Abbildung 29: Bohrvorrichtung für die Holzfeuchtesensoren (links) und installierte Sensorik (rechts) für die hochohmige Widerstandsmessung (Testaufbau).**

### 5.1.3 Messung der Temperatur und Ausgleichsfeuchte im Wandaufbau

Für die Temperaturmessung sowie für die Messung der Ausgleichsfeuchte im Wandaufbau wurden kombinierte Temperatur- und Feuchtesensoren der Firma „E+E Elektronik“ verwendet. Die Messstellen im Mauerwerk nahe des Außenputzes wurden über eine Bohrung erreicht. Die Sensoren wurden mit Hilfe einer Gummimanschette so eingebracht, dass die Bedingungen am Prüfpunkt weitestgehend unbeeinflusst von den Innenraumbedingungen sind. Die Sensoren für den Messpunkt unter der späteren Innendämmschicht wurden jeweils in eine Mauerwerksfuge positioniert und befestigt.



**Abbildung 30: Kombinierte Feuchte- und Temperatursensoren im Mauerwerk und in der Ebene des alten Innenputzes (links), Raumseitige Temperaturmessung (rechts).**

Die raumseitigen Oberflächentemperaturen wurden mit PT100-Sensoren gemessen, welche an der Oberfläche des jeweiligen Innendämmsystems angebracht und mit dem jeweiligen raumabschließenden Deckmaterial verschlossen wurden (z.B. Innenputz).

#### 5.1.4 Messung der Temperatur und relativen Feuchte im angrenzenden Raum

Die Innenraumbedingungen wurden mit kombinierten Temperatur- und Feuchtesensoren der Firma „E+E Elektronik“ gemessen. Diese wurden jeweils in den angrenzenden Räumen des zu untersuchenden Wandaufbaus installiert.

#### 5.1.5 Erfassung der Wetterdaten und Regenmenge auf der Fassade

Zusätzlich wurde über eine auf dem Dach des Nachbargebäudes installierte Wetterstation die Wetterdaten (Temperatur, Feuchte, Wind & Niederschlag) mit Sensoren der Firma Thies erfasst. Die Globalstrahlung wurde mit einem Pyranometer der Firma Kipp & Zonen erfasst.

Zwei Niederschlagssensoren (Fima Thies) an der Fassade erfassten darüber hinaus die Niederschlagsmenge direkt an der Fassade.



Abbildung 25: Wetterstation mit Messtechnik für Temperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Wind und Niederschlag (links), Niederschlagssensor an der Fassade (rechts)

## 5.2 Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung nach vier Messjahren

### 5.2.1 Entwicklung der Holzfeuchte

Die Holzfeuchteentwicklungen in Massenprozent (M%) aller untersuchten Balkenköpfe sind in Abbildung 31 über einen Messzeitraum von über vier Jahren (Juni 2011 bis Juli 2015) dargestellt. Zusätzlich ist die Außentemperatur auf der rechten Seite aufgetragen. Die Holzfeuchten bewegen sich im gesamten Betrachtungszeitraum zwischen knapp unter 10 M% und 18 M%. Sie überschreiten also zu keinem Zeitpunkt den Grenzwert von 20 M%, oberhalb dem bei längerfristiger Überschreitung Bauschäden auftreten könnten. Im ersten Winter nach Fertigstellung der Innendämmmaßnahmen lagen die Holzfeuchten zwischen 13 und 17 M%. Im Sommer 2012 ist eine deutliche Abnahme der Holzfeuchten erkennbar. Auch in Bezug auf den Vorjahressommer liegen im zweiten Sommer deutlich geringere Holzfeuchten vor, was auf ein Austrocknen der Baufeuchte hindeutet. Im weiteren zeitlichen Verlauf ist zu sehen, dass sich die Holzfeuchte mit den jahreszeitlich bedingten Änderungen der Außenluftbedingungen bereits im Jahr 2012 eingeschwungen hat. Im Winterhalbjahr steigt die Holzfeuchte immer an, im Sommerhalbjahr dagegen nimmt die Holzfeuchte regelmäßig wieder ab.

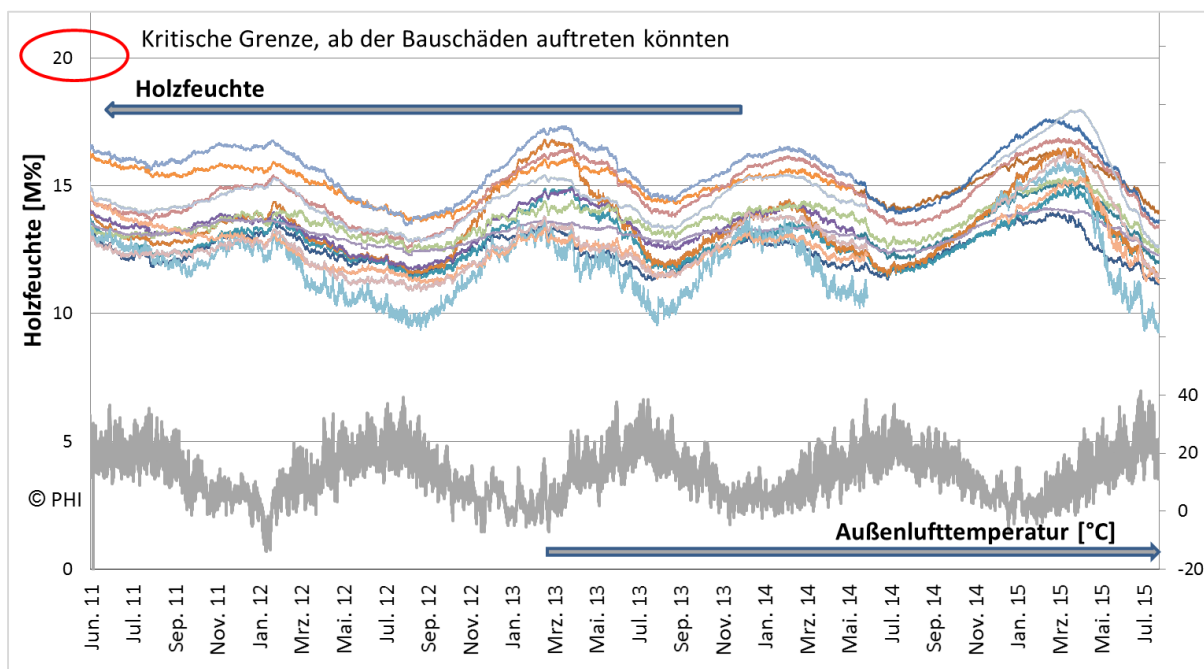


Abbildung 31: Holzfeuchteentwicklung in den Balkenköpfen, Übersichtsdiagramm aller erfassten Holzfeuchtemesswerte

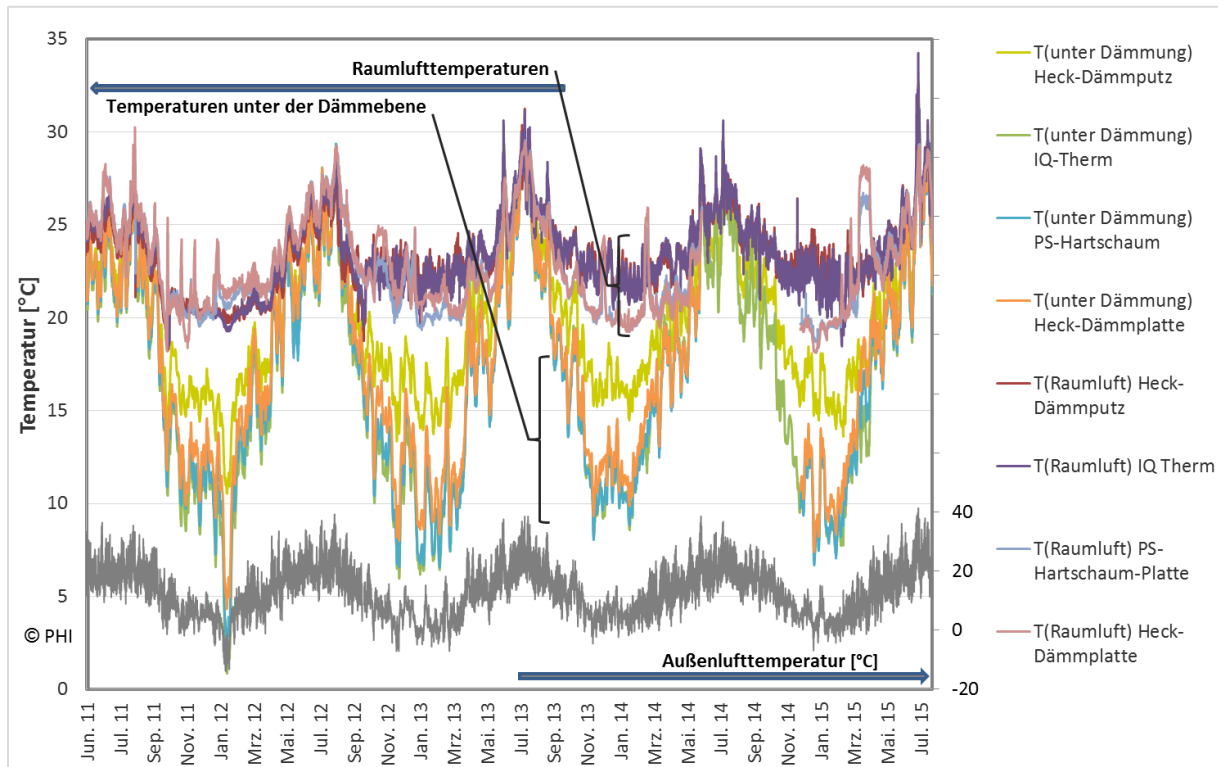
Die Holzfeuchten der unterschiedlichen Balken haben relativ konstante Offsets zueinander. So beträgt der Abstand zwischen minimaler und maximaler Holzfeuchte ca.

5 M%. Die relativ großen Abweichungen kommen vermutlich durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Holzbalken zustande. So werden sich die Balken sowohl bezüglich der Wasserdampfdiffusion und des Transports durch konvektive Prozesse unterscheiden aber auch bezüglich der feuchteabhängigen Widerstände, die bei der Messsignalauswertung angenommen werden. Trotz der Unsicherheiten ist hier auf Grund der sehr niedrigen Holzfeuchten weit unterhalb von 20 % von keinerlei Gefährdung für das Wachstum holzerstörender Pilze auszugehen. Auch ein Anstieg der Holzfeuchte im Sinne einer Auffeuchtung der Balkenköpfe über den Betrachtungszeitraum ist nicht zu beobachten. Als positive Einflüsse auf die Holzfeuchteentwicklung sind hier vor allem der außenseitige Wärmedämmputz zu nennen, welcher gleichzeitig als Schlagregenschutz fungiert, sowie die wohnungsweisen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG), die im Zuge der Modernisierungsmaßnahmen installiert worden sind.

### **5.2.2 Entwicklung der Temperaturen hinter der Dämmebene**

Der bei Innendämmung kritischste Bereich liegt von innen gesehen hinter der Dämmebene. Hier sind die größten Feuchten zu erwarten. In der Abbildung 32 dargestellt sind die Verläufe der Raumlufthtemperaturen (obere Kurvenschar, Primärachse) der an die Dämmsysteme angrenzenden Räume sowie die der Temperaturen hinter den Innendämmsystemen in der alten Putzebene (mittlere Kurvenschar, Primärachse). Zusätzlich ist die Außentemperatur auf der rechten Achse aufgetragen. Die Innentemperaturen schwanken in ihrem zeitlichen Verlauf zwischen weniger als 20 °C im Winter und 30 °C im Hochsommer.

In der warmen Jahreszeit folgen die Innentemperatur und die Temperatur in der alten Putzebene im Wesentlichen der Außentemperatur. In der kalten Jahreszeit liegen die Temperaturen in der alten Putzebene je nach Dämmniveau zwischen Raum- und Außentemperatur. Die thermische Qualität der Dämmsysteme ist an einer möglichst niedrigen Temperatur hinter der Dämmung zu erkennen. Deutlich zu sehen ist, die erhöhte Temperatur unter dem Heck-Dämmputz im Vergleich zu den anderen Innendämmsystemen. Dies scheint aufgrund des höheren Wärmeleitwertes (WLG 070) im Vergleich zu den anderen Systemen (WLG 032 bzw. 042) plausibel, wird aber im Rahmen der Simulationen noch einmal näher untersucht.



**Abbildung 32: Entwicklung der Raumlufthemperaturen sowie der Temperaturen zwischen Dämmsystem und alter Putzebene (obere Kurven und Primärachse) für die jeweiligen Dämmsystemvarianten; in der unteren Kurve dargestellt ist der Verlauf der Außenlufttemperaturen (Sekundärachse)**

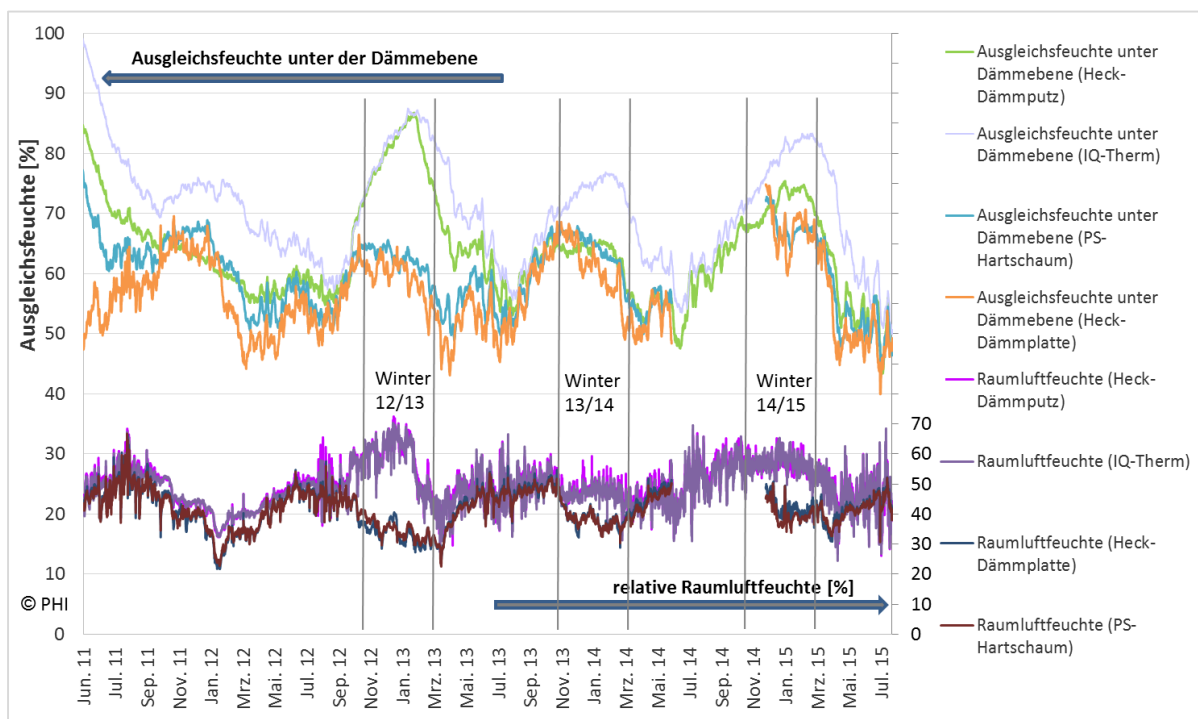
### 5.2.3 Entwicklung der Ausgleichsfeuchten unter den Dämmebenen

In Abbildung 33 (obere Kurven abgetragen auf der Primärachse, links) sind die Ausgleichsluftfeuchten in der alten Putzebene (unter der Isolierung) für die vier untersuchten Dämmsysteme dargestellt. Zusätzlich wurden die relativen Raumlufffeuchten der angrenzenden Räume im 1. OG auf der rechten Sekundärachse im unteren Bereich des Diagramms aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist das Austrocknen der Konstruktion bis zum Frühjahr 2012, was zum Teil durch Bautrockner unterstützt wurde. Baufeuchte wurde durch die Verwendung von Klebern eingebracht kommt aber auch daher, dass das Gebäude zuvor lange Zeit ungenutzt war. Sie hält sich besonders beim iQ-Therm-System lange und ist im Ausgangszustand vergleichsweise hoch (nahe 100 %). Während des Sommerhalbjahrs sind die Unterschiede zwischen den Dämmsystemen eher gering. Ab Herbst 2012 steigt die Feuchtigkeit bis zum Winter wieder stärker an. Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Dämmsystemen zu erkennen: während die Ausgleichsfeuchten unter der Polystyrol-Hartschaumplatte und der mineralischen Heck-Dämmplatte nur geringfügig ansteigen (Anstieg ca. 10 Prozentpunkte), nimmt die Ausgleichsfeuchte unter dem Dämmputz und unter der kapillaraktiven IQ-Therm-Dämmplatte deutlich zu (Anstieg um knapp 30 Prozentpunkte auf bis zu 87%). Vergleicht man nun die Kurven der Raumlufffeuchten mit den Kurven



der Ausgleichsfeuchten hinter der Dämmebene, so kann man eine deutliche Korrelation erkennen. Gerade die diffusionsoffeneren Systeme IQ-Therm sowie Heck-Dämmputz, mit sd-Werten von ca. 0,6 m, weisen in den Winterhalbjahren 2012/2013 sowie 2014/2015 einen sehr starken Anstieg in der Ausgleichsfeuchte (bis über 80%) auf, genau dann, wenn die Raumlufffeuchten deutlich über 50% liegen.

Dem starken Aufweichen der beiden diffusionsoffeneren Dämmsysteme in den Winterhalbjahren 2012/2013 sowie 2014/2015 folgt ab jeweils Frühjahr allerdings auch wieder ein stärkerer Rückgang der Ausgleichsfeuchten. Durch den niedrigen Diffusionswiderstand wird also auch ein schnelleres Austrocknen ermöglicht. Gründe für die erhöhten Raumlufffeuchten werden im folgenden Absatz diskutiert.



**Abbildung 33: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte zwischen Dämmsystem und alter Putzebene (obere Kurven und Primärachse) für die jeweiligen Dämmsystemvarianten sowie Entwicklung der Raumlufffeuchten (untere Kurven abgetragen auf der Sekundärachse)**

## 5.2.4 Entwicklung der relativen Raumlufffeuchten

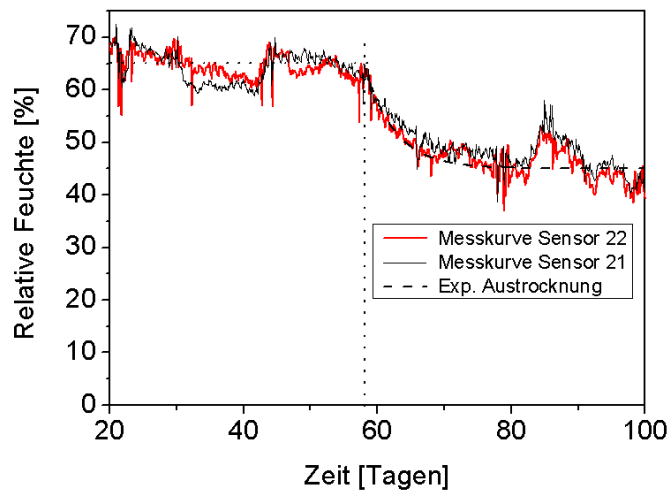
Im Messverlauf schwanken die Raumlufffeuchten zwischen 20 % und 70 % relativer Feuchte. Die Raumlufffeuchten in den zu den Dämmsystemen Heck-Dämmplatte und PS-Hartschaumplatte angrenzenden Räumen blieben in den Winterhalbjahren mit ca. 30-40% vergleichsweise niedrig. Die Ursache dafür liegt in der Nutzung der Wohnung als Verkaufsraum begründet, in welcher es kaum interne Feuchtequellen gab.

Die erhöhten Ausgleichsfeuchten hinter den Dämmsystemen IQ-Therm und Heck-Dämmputz im Winter 2012/2013 sowie im Winterhalbjahr 2014/2015 gehen einher mit

erhöhten Raumlufffeuchten in den angrenzenden Räumen. So steigt die Raumlufffeuchte im zweiten Winter der Messperiode auf fast 70 % an. Die beiden Raumlufffeuchten verlaufen nahezu parallel, da die Sensoren, wie auch die beiden betroffenen Dämmvarianten in derselben Wohnung installiert waren. Derart hohe Luftfeuchten sind für Wohnungen mit geregelter Lüftungsanlage sehr ungewöhnlich. Bei normaler Feuchtelast wird durch den mechanisch erzeugten Luftwechsel eher eine Luftfeuchte von unter 40 % erreicht, wie es im ersten Winter der Fall war. Wird von einer unveränderten Feuchtelast ausgegangen, könnte die Ursache dafür in einer höheren Außentemperatur oder einem reduzierten Luftwechsel liegen. Da die Außentemperaturen vergleichbar waren liegt letztere Möglichkeit am nächsten.

Es gibt zwei wahrscheinliche Ursachen für einen reduzierten Luftwechsel: Zum einen könnte der Volumenstrom durch die Verschmutzung der Filter stark reduziert gewesen sein. Denn während das Untersuchungsobjekt schon bewohnt wurde, waren die Baumaßnahmen in den umliegenden Gebäuden noch in vollem Gange, was zu einer stärkeren Verschmutzung der Filter in den Lüftungsgeräten führen kann. Das sollte aber dann auch zu entsprechend erhöhten Raumlufffeuchten in den übrigen Wohnungen führen, was nicht der Fall ist. Daher ist es wahrscheinlicher, dass das Lüftungsgerät in der Wohnung mit den hohen Feuchtwerten für einen längeren Zeitraum schlichtweg ausgeschaltet war. Dies ist sehr leicht möglich, da sich der Schalter für die Lüftungsanlage gut zugänglich im Flur der Wohnungen befindet [Abbildung 34 \(links\)](#). Nach dem Filterwechsel Anfang Februar 2013 sind die Raumlufffeuchten in der betroffenen Wohnung wieder auf ca. 45% gesunken.

Bei genauerer Betrachtung der Daten in der Wohnung mit den erhöhten Feuchten lässt sich in [Abbildung 34 \(links\)](#) ein exponentieller Abfall der relativen Feuchte erkennen. Dieser ist zu erwarten, wenn sich nach längerer Zeit ein stationärer Feuchtwert eingestellt und dann die Luftwechselrate deutlich erhöht wird. Dann stellt sich nach einiger Zeit wieder ein geringerer, den Außenbedingungen und den Feuchtequellen entsprechender quasistationärer Feuchtwert ein. In [Abbildung 34](#) ist rechts die Position der Steuerung der Stufen (ganz oben) und der Hauptschalter (direkt darunter) in den Wohnungen abgebildet. Ein unbewusstes Regeln der Lüftungsanlage ist hier sehr wahrscheinlich. Um dies deutlich zu machen, ist neben den Raumlufffeuchten in [Abbildung 34 \(rechts\)](#) auch ein exponentieller Fit eingetragen, der eine Zeitkonstante von 4,5 Tagen aufweist. Dies erscheint auf den ersten Blick, wenn man lediglich die Luft als Feuchtespeicher betrachtet, sehr lang zu sein. Da aber über einen längeren Zeitraum die Luftfeuchte erhöht war, hatte sich bereits ein deutlich höheres Feuchteniveau im Wandaufbau eingestellt. Dies spiegelt sich auch in den erhöhten Ausgleichsfeuchten hinter den Dämmebenen wider. Die lange Zeitkonstante kommt also durch die ausgeprägte Feuchtepufferung im Inventar und den Wandaufbauten zustande.



**Abbildung 34: Vergrößerung des steilen Abfalls der gemessenen relativen Feuchten (Sensor 21 & 22) am Ende des Winters 2012/13. Es wurde hier der Verlauf einer Exponentialfunktion mit einer Zeitkonstante von 4,5 Tagen (gestrichelte Linie) für den Austrocknungsprozess angefügt. Rechts ist ein Foto des Schalters für die Bedienung der Lüftungsanlage im Flur zu sehen.**

Im Winterhalbjahr 2013/2014, nach wiederholten Wartungsarbeiten im Sommer 2013 blieben die Raumlufffeuchten in einem Bereich von durchschnittlich 50%. Im Winterhalbjahr 2014/2015 dagegen ist in dieser Wohnung (wie auch in anderen Wohnungen vgl. Anhang 1) die Raumlufffeuchte wieder stärker angestiegen. Die Ursachen könnten an einem fehlenden Wartungszyklus/ Filterwechsel vor Beginn der Heizperiode liegen. Zur Sicherung eines einwandfreien Betriebs der Lüftungsanlage während des Winterhalbjahrs empfiehlt es sich, die Wartungsarbeiten möglichst im Herbst durchzuführen (zu Beginn bzw. noch vor der Heizperiode). Aber auch ein erneutes längerfristiges Abschalten des Geräts ist eine mögliche Ursache.

Dieses Beispiel zeigt deutlich die Bedeutung einer kontrollierten Wohnungslüftung gerade bei Sanierungen mit Innendämmung. Zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit der Lüftungsanlage und des erforderlichen Luftaustauschs ist ein regelmäßiger Wartungszyklus mit Filterwechsel (idealerweise vor Beginn der Heizperiode) erforderlich. Daneben erscheint es als sinnvoll, die Schalter für die Regelung der Lüftungsanlage weniger gut zugänglich zu installieren, um ein unbeabsichtigtes Ausschalten auszuschließen.

Für eine belastbarere Bewertung bzw. Interpretation der unterschiedlichen Anstiege sowohl der Holzfeuchte als auch der Ausgleichsfeuchte unter der Dämmebene, wurden mit den Randbedingungen der messtechnischen Untersuchung anschließend eine hygrothermische Untersuchung der Dämmsysteme durchgeführt, deren Ergebnisse im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

## 6 Hygrothermische Simulation

Die Interpretation der gemessenen Temperatur- und Feuchteprofile an den unterschiedlichen Messstellen ist ohne weiteres nur sehr bedingt möglich. Die Temperaturverläufe lassen sich vielleicht noch im Wesentlichen durch die schwankenden Innen- und Außentemperaturen erklären. Die Entwicklung der Ausgleichsfeuchten ist dagegen ein sehr komplexer, nicht linearer Prozess, der durch eine Reihe verschiedener gekoppelter Einflussfaktoren bestimmt wird. Mehr als tendenzielle Aussagen oder Mutmaßungen sind ohne weitere Untersuchungen nicht möglich. Daher wurden unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften und gemessenen Randbedingungen die zeitlichen Entwicklungen der Temperatur- und Feuchtwerte im Wandaufbau numerisch berechnet. Zum Einsatz zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports kam dabei die hygro-thermische Simulationssoftware Delphin Version 5.6.8. der TU Dresden [Nicolai2010].

Für die Beschreibung des Feuchtetransports in Materialien sind über die Wärmeleitfähigkeit hinaus weitere Materialkennwerte notwendig. Dazu gehören Standardgrößen, wie die Dichte, die Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Dampfdiffusionswiderstandszahl. Weitere feuchtespezifische Größen sind der Wasseraufnahmekoeffizient, die Flüssigwasserleitfähigkeit und Angaben über das Wasseraufnahmevermögen der Materialien. Dazu gehören die offene Porosität, die das gesamte offene Porenvolumen pro Materialvolumen beschreibt und die effektive Wassersättigung, die den maximalen Wassergehalt im Material bei Normaldruck und 100 % relativer Feuchte angibt. Neben den konstanten Materialparametern gibt es noch Funktionen wie die Sorptionsisothermen, die den materialspezifischen Zusammenhang zwischen Wassergehalt und umgebender Ausgleichsfeuchte (relativer Feuchte) wiedergeben. Die Materialdaten wurden aus der Delphin Datenbank (Version 5.6.8 bzw. 5.8) entnommen und gegebenenfalls mit Angaben aus den Datenblättern der Hersteller angepasst. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 3 aufgelistet.

In diesem Kapitel werden zunächst die verwendeten Randbedingungen diskutiert und anschließend die Simulationsergebnisse vorgestellt und mit den Messergebnissen verglichen. Es wird mit der Diskussion einer ausführlichen Simulationsreihe für die ersten knapp zwei Jahre des Messzeitraums begonnen. Zu diesem Zeitpunkt wurden eindimensionale Simulationen des Wandaufbaus und zweidimensionale Rechnungen für die Balkenköpfe durchgeführt. Dies war zu dem frühen Zeitpunkt sinnvoll, um frühzeitig Hinweise auf das Funktionieren bzw. mögliche Problemstellen in der Konstruktion erhalten zu können. Zum Ende der Messperiode wurden noch einmal Simulationen für die eindimensionalen Wandaufbauten durchgeführt.

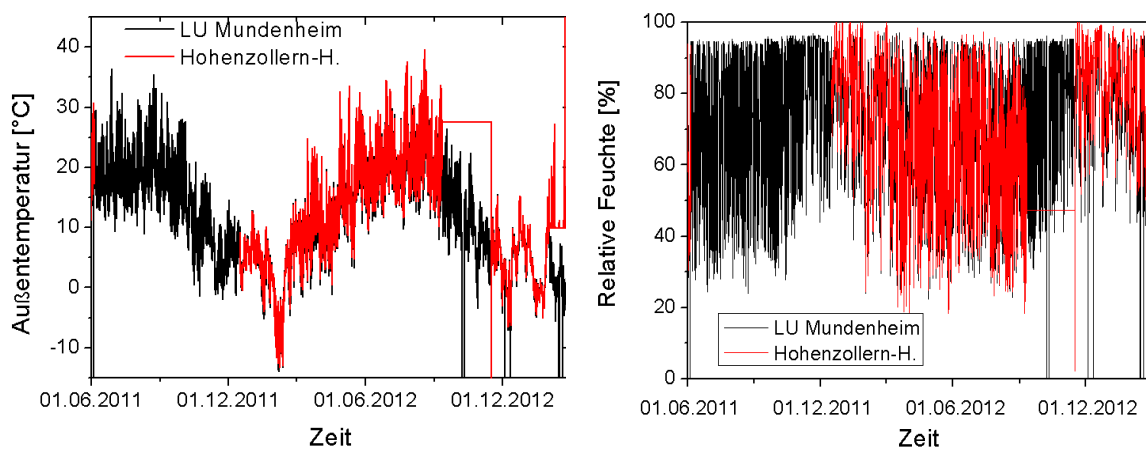


Konstruktion	Materialien	Dicke	Dichte	Wärme- kapazität	Wärme- leitfähigk.	Offene Porosität	Eff. Wasser- sättigung	Wasserauf- nahmekoeff.	Dampfdiff.- widerstand	Flüssigleit- fähigkeit
		[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>-0,5</sup> ]	[-]	[s]
Bestand	Außenputz	10	1900	850	0.75	0.24	0.21	0.025	20	2,7 e-5
	Dämmputz	20	275	1000	0.07	0.56	0.27	0.01	8	9,8 e-9
	Kalkstein	380	1814	936	1	0.34	0.33	0.052	39.8	4,3 e-12
1 Dämmputz	Dämmputz	60	275	1000	0.07	0.56	0.27	0.01	8	9,8 e-9
	Kalkzementputz	10	1900	850	0.75	0.24	0.21	0.025	20	2,7 e-5
2 IQ-Therm	Kleber	15	1313	863	0.497	0.5	0.28	0.005	18.7	5,6 e-12
	PU-Platte (Kapillaraktiv)	50	49	1400	0.037	0.98	0.93	0.0129	27	1,2 e-9
	Mineral Putz	15	1267	1453	0.48	0.52	0.33	0.222	14	2,9 e-11
3 PS-Platten	Kleber	20	1516	1000	0.7	0.4	0.3	0.012	32	1,0 e-9
	PS-Hartschaumplatte	40	20	1300	0.04	0.97	0.95	-	50	-
	Gipsplatte	25	850	850	0.2	0.65	0.551	0.277	10	6,3 e-9
4 Mineral- dämmplatten	Kleber	15	975	1000	0.31	0.55	0.33	0.05	18	1,0 e-9
	Mineral Dämmplatte	50	105	950	0.041	0.94	0.554	0.23	5	9,2 e-12
	Mineral Putz	5	1900	850	0.75	0.24	0.21	0.025	20	2,7 e-5

Tabelle 3: Auflistung der für die Simulationen verwendeten Materialeigenschaften für die vier verschiedenen Innendämmsysteme und das Bestandsmauerwerk mit aufgebrachttem Außen- und Dämmputz.

## 6.1 Randbedingungen für die hygrothermischen Simulationen der ID-Systeme

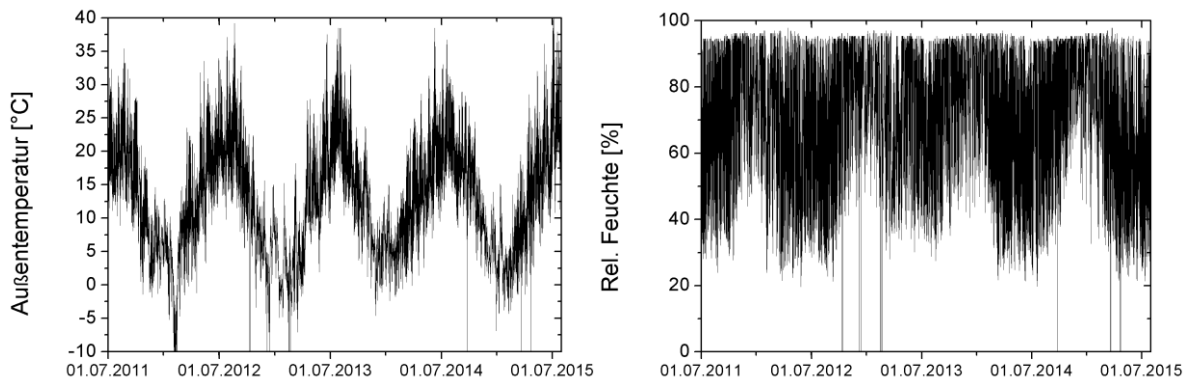
Das thermische und hygrische Verhalten eines Wandaufbaus, wie er hier betrachtet werden soll ist sowohl von den äußeren als auch von den inneren klimatischen Randbedingungen abhängig. Für die Beurteilung, ob ein Aufbau sicher ausführbar ist, werden meist lokale Klimadaten von Testreferenzjahren bzw. standardisierte Innendbedingungen angenommen. Für einen Vergleich von Messung und Simulation, welcher hier durchgeführt werden soll, müssen dagegen möglichst die realen klimatischen Bedingungen (sowohl innen als auch außen) während des Messzeitraums angesetzt werden.



**Abbildung 35: Stundenwerte der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit für die ersten 1½ Messjahre gemessen mit der eigenen Wetterstation auf den Hohenzollern-Höfen (rot) bzw. von der Wetterstation Mundenheim (schwarz).**

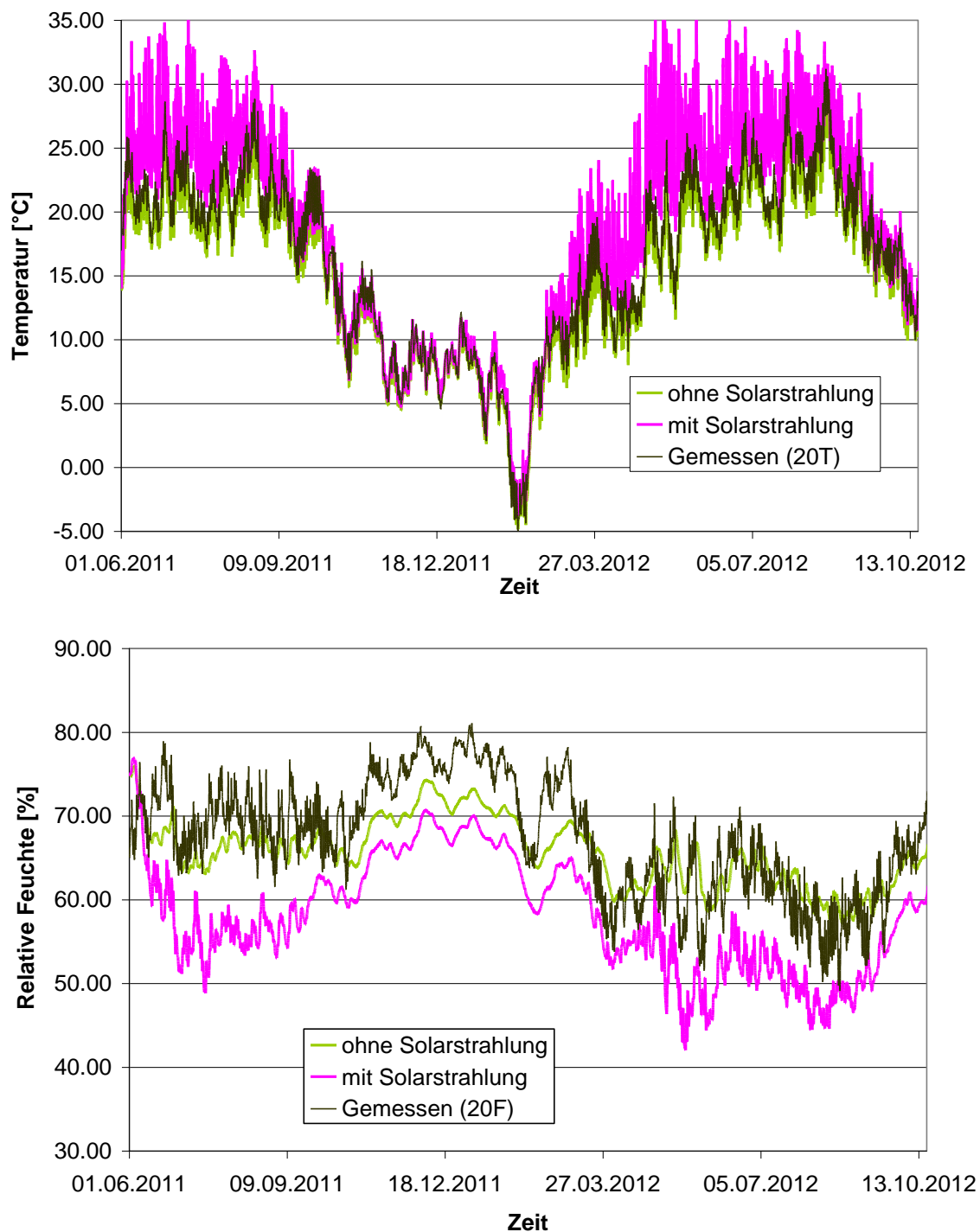
### 6.1.1 Außenklima

Die Außenklimadaten (Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag) wurden durch eine Wetterstation auf dem Dach des Nachbargebäudes gemessen (s. dazu auch Abschnitt 5.1.5). Die Messung der Daten vor Ort ist besonders für die Ermittlung des Schlagregens wichtig, da Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung lokal deutlich variieren können. Die Messdaten für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden mit denen der Wetterstation Ludwigshafen Mundenheim [ZIMEN] verglichen. Die sehr gute Übereinstimmung ist in Abbildung 35 sowohl für Temperatur als auch für die Luftfeuchte in den ersten 1½ Messjahren zu sehen. Wegen größerer Ausfallzeiten der eigenen Wetterstation wurden daher für die Simulationen im Weiteren die Daten der Wetterstation Mundenheim (s. Abbildung 36) verwendet. Als Wärmeübergangskoeffizienten wurde an der Außenseite  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$  [Schaube1986] und  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  [WTA6-2] an der Innenseite des Wandaufbaus angesetzt.



**Abbildung 36: Stundenwerte der Wetterstation der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit für den gesamten Messzeitraum, die für die Simulation verwendet wurden (Wetterstation Mundenheim).**

Aus der gemessenen Globalstrahlung wurde über die Erbs-Korrelation auf die direkte und die diffuse kurzwellige Strahlung geschlossen. Für die Berechnung der Solarstrahlung ist auch die Ausrichtung der betrachteten Wand von Bedeutung. Diese ist in süd-östliche Richtung orientiert und weist eine Abweichung von der Nordrichtung um  $138^\circ$  auf. Lücken in den Globalstrahlungsdaten wurden mit Werten aus dem Referenzjahr für Ludwigshafen (aus METEONORM 7) aufgefüllt. Um den Einfluss der Globalstrahlung auf die am weitesten außen liegende Messstelle - den Messpunkt im Mauerwerk - zu untersuchen, wurde die kurzwellige Solarstrahlung in der Simulation für die PS-Dämmplatten versuchsweise nicht mit abgebildet. Das Ergebnis war, dass die Korrelation von Simulation und Messung wesentlich besser ohne die Solarstrahlung ist (s. Abbildung 37). Ein Grund hierfür ist, dass die gegenüber liegende Häuserzeile und die davor stehenden Bäume für eine Teilverschattung der Fassade sorgen und somit die auftreffende Solarstrahlung reduzieren. Auch die helle Farbe der Fassade reduziert den Einfluss der Solarstrahlung. Aus diesen Erkenntnissen wurde die Konsequenz gezogen, die Solarstrahlung nicht zu berücksichtigen. Dies geschah im Wesentlichen, um den Aufwand für die zweidimensionalen Berechnungen der Balkenköpfe zu vereinfachen. In der am Ende der Messperiode durchgeführten Untersuchung der Ausgleichsfeuchten hinter der Dämmebene wurde dagegen festgestellt, dass bei Berücksichtigung der Solarstrahlung doch wesentlich bessere Übereinstimmungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen erzielt werden konnten. Diese wurden noch einmal besser, als die reale Verschattungssituation durch die Baumreihe vor der Fassade berücksichtigt wurde (s. Abschnitt 6.4). Dadurch wird die Solarstrahlung auf 50 % des ursprünglichen Wertes reduziert (PHPP-Berechnung mit dem Blatt Verschattung). Es zeigt sich hier, welche wichtige Rolle ein realistischer Ansatz der Strahlungswerte spielt und welchen Einfluss sie haben kann.



**Abbildung 37: Temperatur und Feuchteprofil im Außenbereich des Mauerwerks für PS-Dämmplatten. Aufgetragen sind die Simulationsergebnisse mit und ohne kurzweiliger Solarstrahlung und die Messwerte.**



Die Schlagregenbelastung auf die Fassade kann aus der horizontalen Regenmenge, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung abgeschätzt oder direkt an der Fassade gemessen werden. Bei diesem Projekt wurde die zweite Variante gewählt. Der mögliche Einfluss von Schlagregen wurde zusätzlich anhand von Referenzklimadaten untersucht. Dabei wurde auch der sehr wichtige Wasseraufnahmekoeffizient der äußeren Putzschicht variiert und festgestellt, dass die relative Feuchte auch an der äußersten Messposition im Bestandsmauerwerk nur schwach durch Schlagregen beeinflusst wird. Gründe hierfür sind der neue Außenputz mit wasserabweisenden Eigenschaften und die geringe Niederschlagsmenge am Standort. Ludwigshafen ist in der Schlagregengruppe II (auf eine Skala von I bis III) einzuordnen. Hätte der Schlagregen einen deutlichen Einfluss, so müssten in den Messungen der relativen Feuchten – besonders im äußeren Bereich des Mauerwerk – nach Regenereignissen Feuchtepeaks auftreten. Solche Charakteristika konnten allerdings in den Messdaten nicht gefunden werden. Folglich kann der Einfluss durch Schlagregen nur gering sein. Aus diesen Gründen und zur Vereinfachung besonders für die zweidimensionalen Simulationen wurde daher auf die Betrachtung von Schlagregen in den Simulationen verzichtet. Auf Grund der teils sehr guten Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messungen, scheint dieses Vorgehen in diesem konkreten Fall mit dem neu installierten, wasserabweisenden Außenputz vertretbar zu sein.

### **6.1.2 Innenraumklimata**

Als Innenrandbedingungen für die Simulationen wurden die gemessenen relativen Luftfeuchten und Temperaturen in dem jeweils an den betrachteten Wandaufbau angrenzenden Raum angesetzt. Eine Diskussion der gemessenen Daten ist in Abschnitt 5.2.4 zu finden.

## **6.2 Detaillierter Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen für die Wandaufbauten**

Damit die Ergebnisse der Simulationen des mit den Messwerten vergleichbar sind, müssen die Ergebnisse der Simulationen an den entsprechenden Messpunkten ausgewertet werden. Dazu wurden die Modelle den Planungen entsprechend aufgebaut und die Ausgaben an den Messpunkten definiert. Die Simulationen konzentrieren sich im Wesentlichen auf das 1. OG, in dem die meisten Sensoren verbaut sind und damit die meisten Informationen vorliegen.

Ein Beispiel für ein Delphin Simulationsmodell ist in Abbildung 38 zu sehen. Dort ist auch die verwendete Diskretisierung für den Wandaufbau mit erhöhten Dichten an den Materialgrenzen zu erkennen ist. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse an den verschiedenen Messpunkten je Dämmsystem diskutiert.

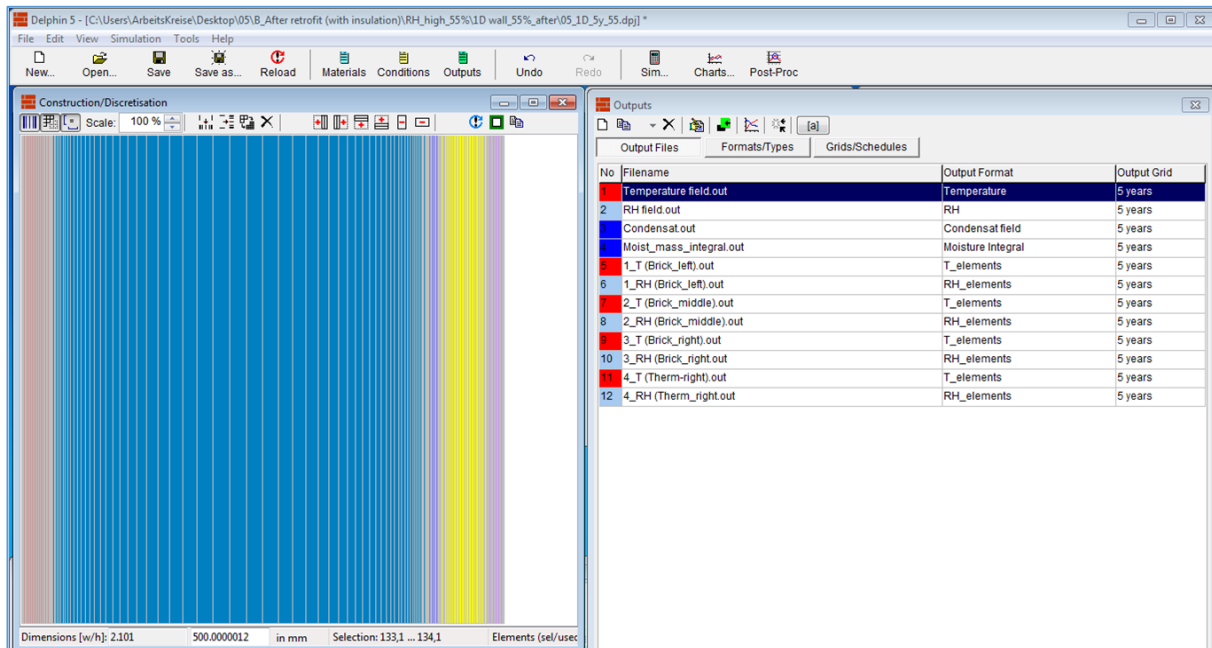


Abbildung 38: Screenshot des 1-d Delphin Modells mit der verwendeten Diskretisierung (links)

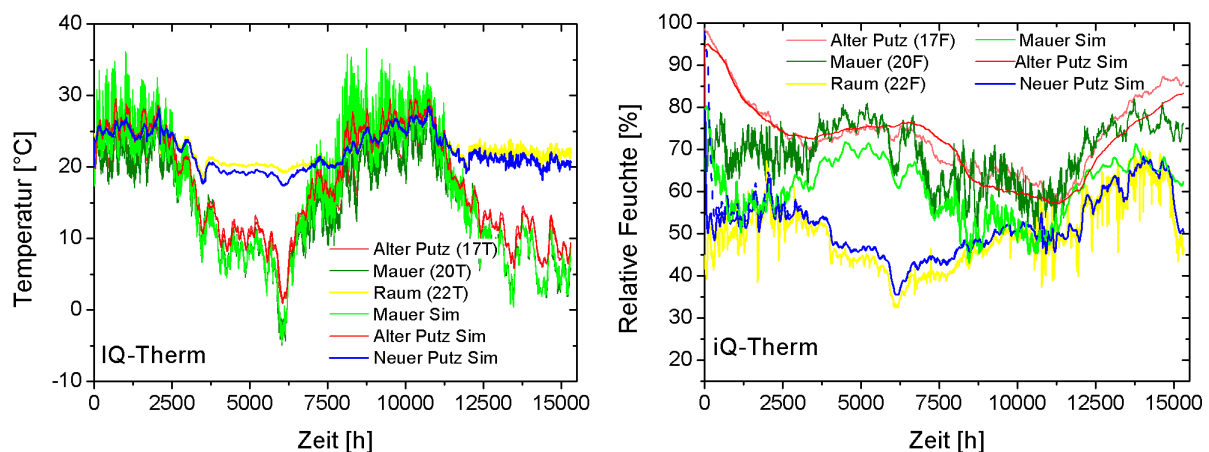
### 6.2.1 Remmers iQ-Therm

Die Messergebnisse für das IQ-Therm Dämmsystem sind in Abbildung 39 dargestellt. Aufgetragen sind die Temperaturen und relativen Feuchten an der Außenseite des Mauerwerks, in der alten Putzebene (unter dem Dämmsystem) und in der neuen Putzebene an der raumzugewandten Seite des 1. OG. Sie sind jeweils mit der Sensornummer und der Bezeichnung T für Temperaturen und F für relative Feuchten beschriftet. Die Dämmwirkung der Innendämmung ist sehr gut für den kalten Zeitraum um die Stunde 6000 des Messzeitraums zu sehen: Die Temperatur hinter der Dämmung in der alten Putzebene liegt knapp über dem Gefrierpunkt, wobei die Temperatur im Mauerwerk sogar unter dem Gefrierpunkt liegt. Vor der Dämmung lag die Temperatur an diesem Punkt nah an der Raumtemperatur, ähnlich, wie es in der Messung für die neue Putzebene (PutzNeu) der Fall ist. Beim Vergleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation ist eine sehr gute Übereinstimmung über weite Bereiche für alle Sensoren zu erkennen.

Auch die simulierten und gemessenen relativen Feuchten an den drei Messstellen verlaufen nahezu parallel. Im Bereich der alten Putzebene ist zunächst die Austrocknung der Baufeuchte zu sehen (rot). Um die Simulation in Einklang zu bringen mussten für die Startbedingungen im iQ-Fix und iQ-Therm erhöhte Feuchten von 98 % angesetzt werden. Die maximalen Abweichungen betragen hier weniger als 5 %. Das ist nur wenig mehr als der spezifizierte Fehler von 3 % für die Messung der relativen Feuchte. Die relative Feuchte im Mauerwerk liegt über den gesamten Messzeitraum leicht oberhalb der simulierten Feuchte. Im Schnitt betragen die Abweichungen ca. 10 %. Die

Vernachlässigung des Schlagregeneintrags wird hier eine gewisse Rolle spielen. Deutlich ist aber auch, dass die Verläufe sehr parallel sind und daher einzelne Schlagregeneignisse nur geringe Auswirkungen auf den Feuchtegehalt im Mauerwerk aufweisen. Die relativen Feuchten aus Messung und Simulation in der neuen Putzebene oberhalb des Dämmsystems liegen sehr eng zusammen.

Insgesamt konnte also für das IQ-Therm-Dämmsystem eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen und relativen Feuchten festgestellt werden. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass die Materialeigenschaften von der IQ-Serie im Gegensatz zu den übrigen Materialien als einzige inklusive der feuchteabhängigen Funktionen vollständig in der Delphin-Datenbank enthalten sind. Die guten Übereinstimmungen der Verläufe der relativen Luftfeuchten im Mauerwerk und in der alten Putzebene sprechen dafür, dass die angesetzten Materialparameter die Eigenschaften des gesamten Aufbaus, also auch der Bestandskonstruktion gut widerspiegeln.

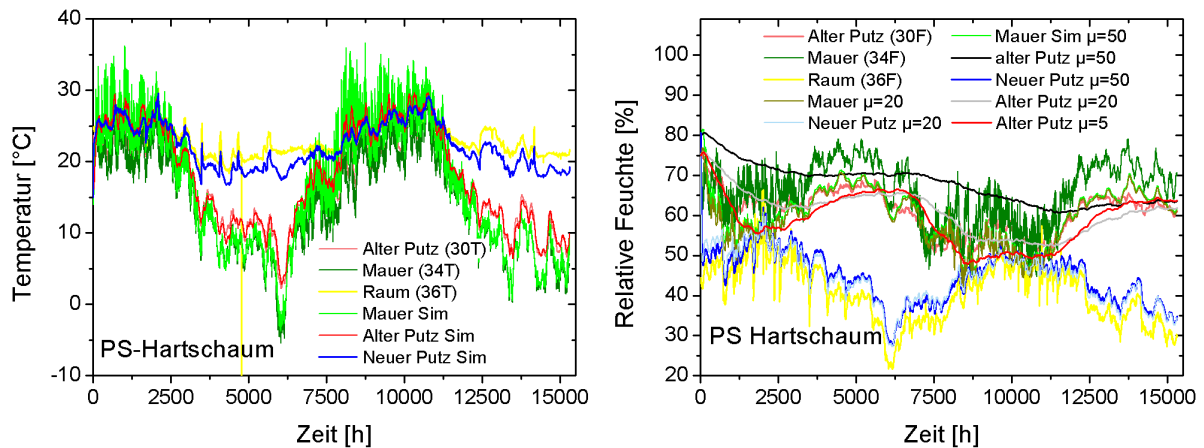


**Abbildung 39: Gemessene und simulierte Stundenwerte der relativen Luftfeuchten und Temperaturen im mit dem iQ-Therm gedämmten 1. OG.**

### 6.2.2 Knauf PS-Hartschaumplatten (InTherm)

Auch die simulierten Temperaturverläufe im Wandaufbau mit den PS-Hartschaumplatten stimmen gut mit den gemessenen Werten überein (s. Abbildung 40, links). Im rechten Teil der Abbildung 40 sind die relativen Feuchten aufgetragen. Für einen Dampfdiffusionswiderstand von  $\mu = 50$ , wie er in der Delphin Datenbank aufgeführt ist, stimmen die Tendenzen im Mauerwerk und in der neuen Putzebene recht gut überein. Die jahreszeitliche Schwankung in der alten Putzebene ist in der Simulation (schwarze Kurve) dagegen im Vergleich zu den Messungen sehr stark gedämpft. Daher wurde in der Simulation der Dampfdiffusionswiderstand auf  $\mu = 20$  (grau) bzw.  $\mu = 5$  (rot) reduziert. Dadurch kann eine deutlich bessere Korrelation zwischen Messung und Simulation erzielt werden. Literaturwerte für PS liegen allerdings eher bei deutlich höheren Werten zwischen 30 und 180 [MASEA]. Die Herstellerangaben von Knauf betragen im

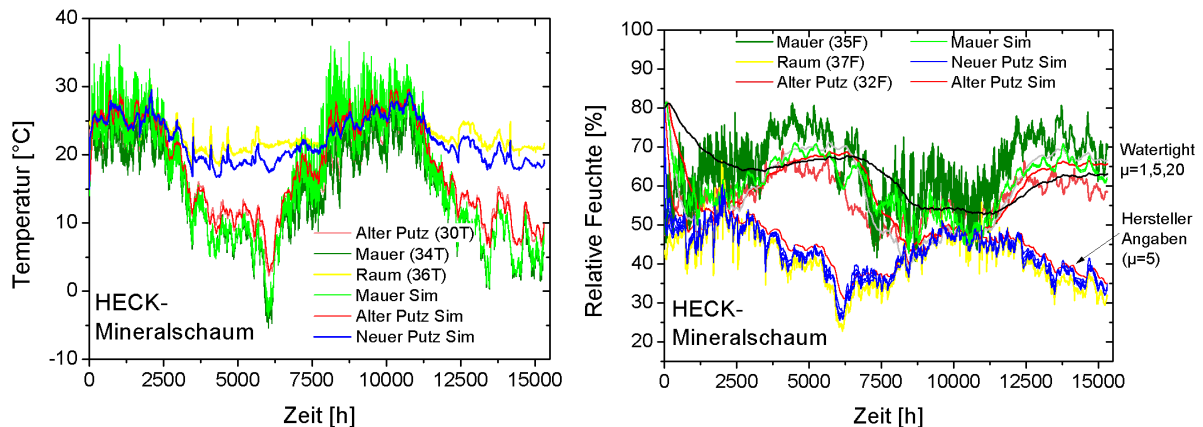
trockenen Zustand  $\mu = 70$  im feuchten Zustand  $\mu = 30$  (Datenblatt Knauf). Die Annahme von einem  $\mu$ -Wert von 5 scheint daher unrealistisch. Ein Wert von 20 liegt dagegen am unteren Ende des Erwartungsbereichs. Für eine weitere Diskussion sei auf den Abschnitt 6.4 verwiesen.



**Abbildung 40: Gemessene und simulierte Stundenwerte der relativen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen im mit den PS-Hartschaumplatten gedämmten 1. OG.**

### 6.2.3 HECK Mineralschaumplatte

Eine sehr gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe aus Simulation und Messung ist auch bei den Mineralschaumplatten der HECK Serie in Abbildung 41 zu beobachten. Bei der Betrachtung der relativen Feuchten fällt zunächst auf, dass sich die relative Feuchte in der alten Putzebene entsprechend der in der neuen Putzebene verhält (dünne rote Linie verläuft parallel zu Raumlufffeuchte und Feuchte in neuer Putzebene). Der Messung nach ist allerdings die Feuchtigkeit in der alten Putzebene eher an die Mauer gekoppelt. Hier scheinen also die Materialparameter nicht zu stimmen. Das Simulationsergebnis ändert sich auch deutlich, wenn die bereits niedrige Flüssigleitfähigkeit auf null gesetzt wird. Eine weitere Anpassung an die Messwerte wurde durch Variation des Dampfdiffusionswiderstands verfolgt. Die beste Übereinstimmung haben hier die Kurven für  $\mu = 1$  (grau) und  $\mu = 5$  (rot) ergeben. Etwas schlechter liegt die für  $\mu = 20$ . Die Verläufe der relativen Feuchten im Mauerwerk und in der neuen Putzebene ändern sich bei den Parametervariationen auch, sie wurden aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Insgesamt ist die Anpassung hier etwas schlechter als bei den zwei vorherigen ID-Systemen.

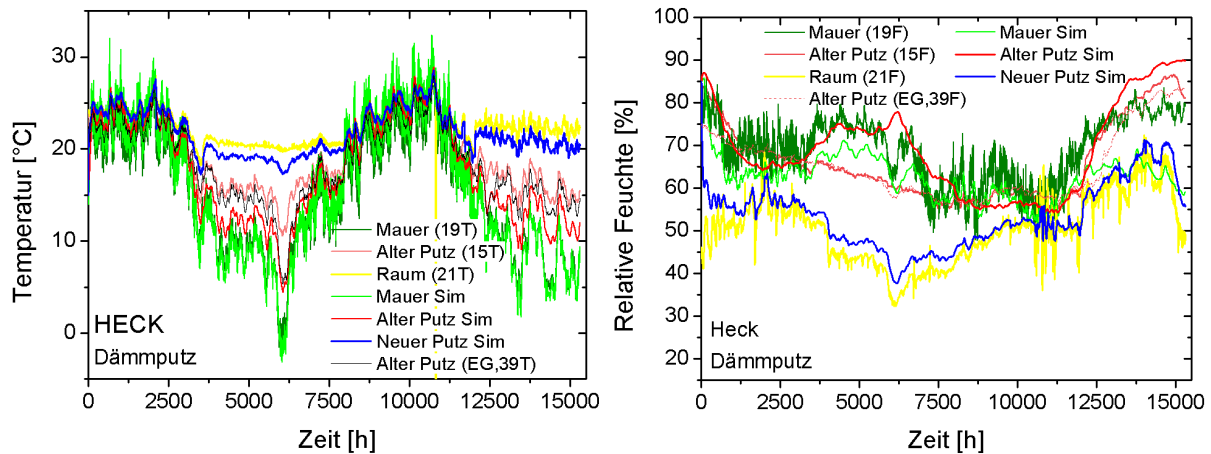


**Abbildung 41: Gemessene und simulierte Stundenwerte der relativen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen im mit den HECK Mineralschaumplatten gedämmten 1. OG.**

#### 6.2.4 HECK Dämmputz

Bei den Temperaturverläufen fällt eine deutliche Abweichung zwischen Simulation und Messung für den sehr kalten Zeitpunkt im Winter 2011/12 sowie allgemein im Winter auf. Die höhere gemessene Temperatur in der alten Putzebene spricht für eine schlechtere Dämmwirkung als angenommen. Es könnte hier also entweder eine allgemein für den Dämmputz überschätzte Dämmwirkung (z.B. ein prinzipieller Ausführungsfehler) oder ein lokales Problem (z.B. ein Riss im Putz) vorliegen. Ein Vergleich mit dem Messergebnis des Sensors im EG (Sensor 39, schwarze Linie in Temperaturdiagramm) liefert hier keine klare Antwort. Im Bereich der kältesten Außentemperatur verhält sich die Temperatur im Erdgeschoss zwar ähnlich zu den übrigen Dämmsystemen und der Simulation, in den Übergangszeiten allerdings liegt eine ähnlich große Abweichung wie beim 1. OG vor. Der Temperaturverlauf in der alten Putzebene wird deutlich besser durch eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,3 \text{ W/mK}$  anstelle der Herstellerangabe von  $0,07 \text{ W/mK}$  beschrieben.

Die gemessenen relative Feuchten im Mauerwerk und in der neuen Putzebene stimmen ähnlich gut mit den Simulationen überein wie die übrigen Dämmsysteme. Die relative Feuchte in der alten Putzebene hat allerdings bei den simulierten Werten im Winter 2011/12 einen Peak, der messtechnisch nicht beobachtet werden konnte. Dieser reduziert sich allerdings deutlich wenn eine größere Wärmeleitfähigkeit angesetzt wird. Der Verlauf im Winter 2012/13 ist dagegen relativ unkritisch gegenüber Änderungen in  $\lambda$  und  $\mu$ -Werten.



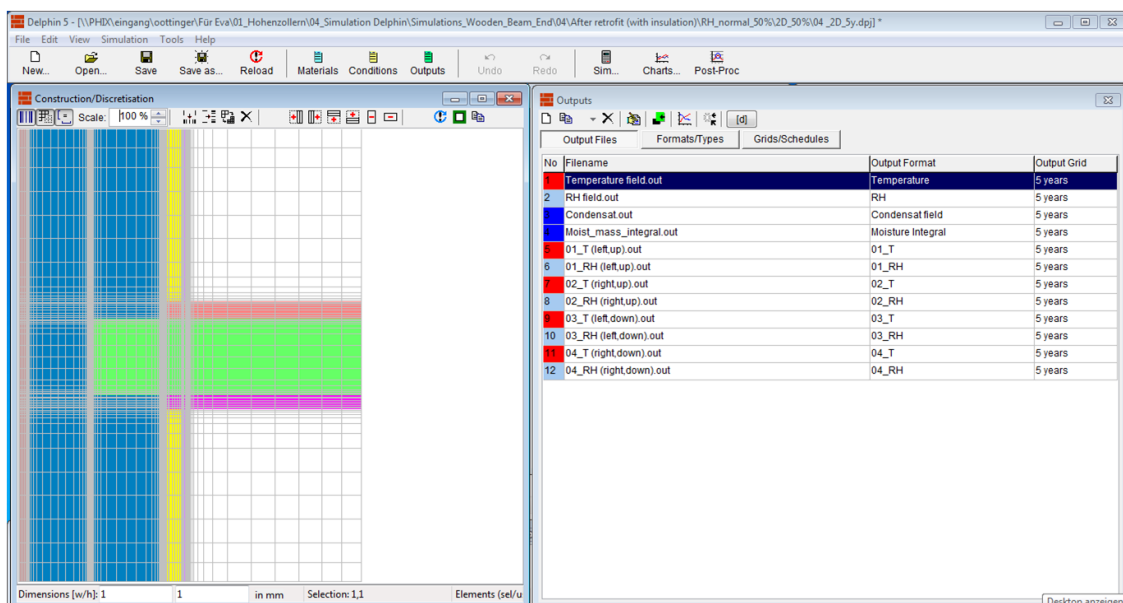
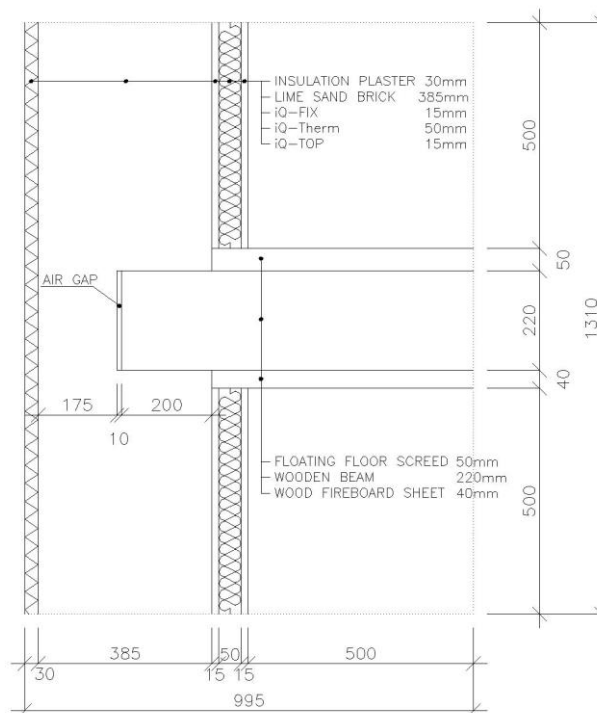
**Abbildung 42: Gemessene und simulierte Stundenwerte der relativen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen im mit dem HECK Dämmputz gedämmten 1. OG. Zusätzlich aufgetragen ist der Temperaturverlauf im alten Putz im EG.**

### 6.3 Detaillierter Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen für die Holzbalkenköpfe (2-d) in den ersten zwei Wintern

Nachdem eine weitgehend gute Übereinstimmung für die verschiedenen Dämmsysteme in den eindimensionalen Simulationen der Wandaufbauten erzielt werden konnte, wurden die Simulationen für die Holzbalkenköpfe aufgesetzt. Aufgrund des großen Zeitaufwands für die zweidimensionalen Modellierungen wurden hierzu bereits im Vorfeld einige Vereinfachungen getroffen. Weiter wurden teils Details der Aufbauten vereinfacht. So wurde der Fußbodenaufbau nicht komplett modelliert, sondern nur der Estrichboden betrachtet. Auch wurde der Außenputz vor dem äußeren Dämmputz nicht gesondert, sondern mit gleichen Eigenschaften wie der Dämmputz modelliert (vgl. Abbildung 43, oben). Hierdurch konnte der Zeitaufwand in einem Rahmen von einigen Stunden pro Simulationslauf gehalten werden. Auffällig im Modell in Abbildung 43, unten ist der „Strich“, der in Höhe des Balkenkopfes vertikal die Mauer schneidet. Dies ist ein simulierter Luftspalt am Ende des Balkenkopfes. Die feine Diskretisierung hierfür geht durch den gesamten Maueraufbau, da Diskretisierungen in Delphin nur zeilen- und spaltenweise angepasst werden können.

Um die zeitlichen Verläufe von Temperaturen und Feuchten bildlich darstellen zu können, wurden neben den Sensorwerten, die an der äußeren unteren Seite des Balkenkopfes gemessen wurden, die Simulationsergebnisse für vier Punkte im Balkenkopf ausgegeben. Jeweils ein Volumenelement von  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  wurde an den Ecken (oben und unten) des Balkenkopfes sowie auf Höhe des Mauerwerks (oben und unten) ausgegeben. Die Entscheidung zu dieser Darstellung fiel, um zum einen eine gewisse Information über die Verteilung der Temperaturen und Feuchten im Balkenkopf zu erzielen – es konnte nicht von vornherein davon ausgegangen werden, dass der Messpunkt der kritischste Punkt ist. Zum anderen war die genaue Position der Messfühler

in den Balkenköpfen nur abgeschätzt. Die Bohrlöcher wurden zwar mit einer Messlehre mit vorgegebenem Winkel gebohrt. Trotzdem war der Abstand des Sensors vom Balkenkopfende nicht genau bekannt (z.B. unbekannte Form des Balkenkopfes (z.B. gerade, konkav, konvex)). Am ehesten sollte der Simulationspunkt A (außen, unten) mit dem Messpunkt übereinstimmen. Daher wurden jeweils die simulierten Verläufe für Punkt A sowie die Messwerte fett und die übrigen Simulationspunkte nur dünn eingetragen.



**Abbildung 43: Aufbau des zweidimensionalen Modells mit Materialangaben und Abmessungen (oben). Unten ist der Screenshot eines zweidimensionalen Delphin Modells mit der verwendeten Diskretisierung (links) abgebildet.**

In den folgenden Abbildungen sind die Temperaturen und die relativen Feuchten in den Balkenköpfen für dargestellt. Es sind neben den Simulationsergebnissen für die Punkte A-D im Balkenkopf die Messwerte von zwei bzw. drei Balken für die verschiedenen Dämmsysteme aufgetragen.

Betrachtet man nur die Messwerte, so fallen bereits die großen Abweichungen zwischen den verschiedenen Balken auf. Die Temperaturverläufe aus den Simulationen entsprechen weitgehend dem Bereich der gemessenen Temperaturen. Bezüglich der relativen Feuchten sind deutlich größere Abweichungen zu sehen. Zum einen sind die Verläufe aus den Simulationen deutlich gedämpfter als die gemessenen Feuchten. Zum anderen sind aber auch deutlich Offsets erkennbar. So liegen die simulierten Feuchtwerte am äußeren Ende des Balkenkopfes für das PS-System deutlich über den Messwerten und auch über den Werten weiter zum Innenraum hin (Punkte B & C). Wird nach der besten Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung so scheint der Messpunkt B am passendsten. Dieser bildet am ehesten den Mittelwert der Messwerte ab. Die jährliche Schwankung liegt hier allerdings bei deutlich weniger als 10 % r.F. wohingegen die Messwerte zwischen 10 % und 25 % schwanken. Die Holzfeuchten für die Messungen im Bereich der Mineralschaumplatten von HECK weisen mit 55-75 % deutlich höhere Feuchte als die simulierten Werte (48-58 %) auf. Eine Gefahr von Schimmelwachstum ist bei relativen Feuchten von unter 80 % allerdings extrem gering. Für den Dämmputz sind drei Messkurven vorhanden, die recht parallel verlaufen. Sie haben Amplituden von ca. 15 %, allerdings untereinander Offsets von ca. 10 %. Besonders für dieses Beispiel wird deutlich, dass die simulierten Kurven sich durchaus innerhalb der Bereiche bewegen, in denen sich die gemessenen Feuchten liegen.

Ein ganz wichtiger Punkt, der angesprochen werden muss, ist, dass hier die relativen Feuchten (Ausgleichsfeuchten) in den Balken aufgetragen sind. Direkt gemessen wurden allerdings Kapazitäten aus denen dann die Holzfeuchten berechnet wurden. Zur Bestimmung der relativen Feuchten aus den Holzfeuchten wurde die Sorptionsisotherme für Fichtenholz aus der Delphindatenbank genutzt. Da bei jeder Umrechnung Unsicherheiten bestehen, sind deutlich größere Diskrepanzen zwischen Simulation und Messwerten zu erwarten, als sie bei den Wandaufbauten aufgetreten sind. Eine nicht zu vernachlässigende Ungenauigkeit ist, dass z.B. der Diffusionswiderstand in Holz entlang und quer zur Faserrichtung nicht homogen ist. Im Simulationsprogramm ist allerdings nur die Eingabe homogener Materialeigenschaften möglich.



## Knauf PS-Hartschaumplatten (InTherm)

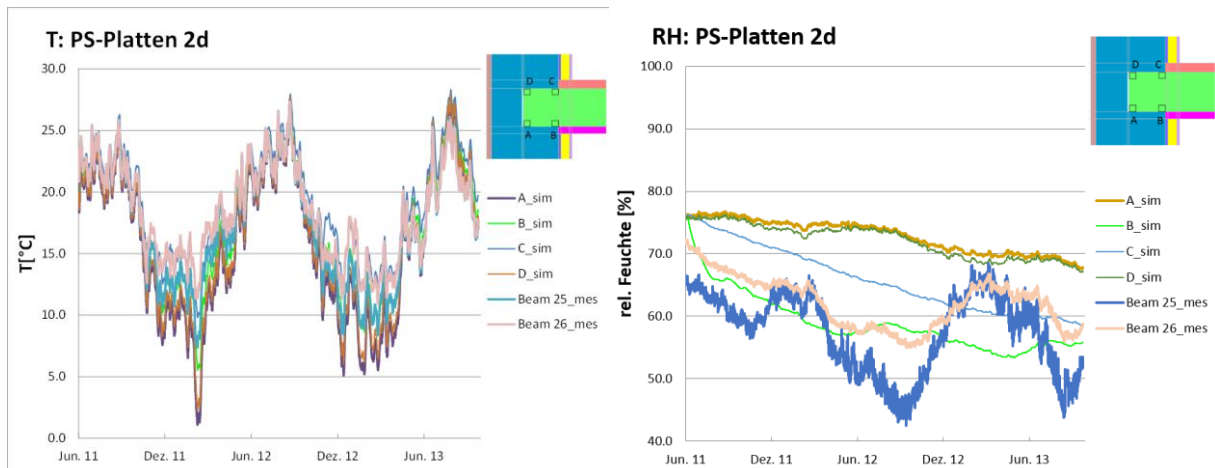


Abbildung 44: Temperaturprofile (links) und Verlauf der relativen Feuchten (rechts) in den Balkenköpfen im Bereich der PS-Dämmplatten.

## HECK Mineralschaumplatte

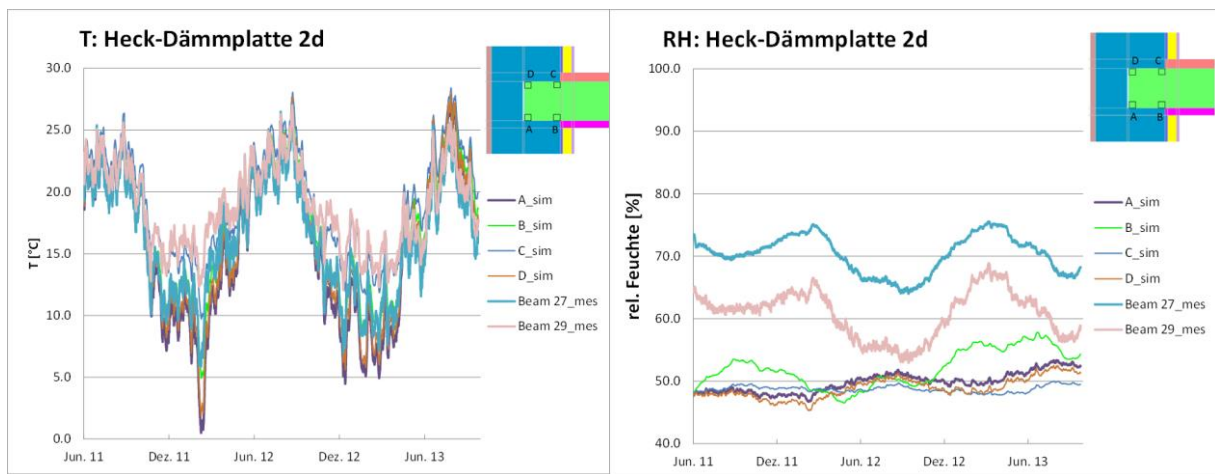


Abbildung 45: Temperaturprofile (links) und Verlauf der relativen Feuchten (rechts) in den Balkenköpfen im Bereich der Heck Mineralschaumplatten.

## HECK Dämmputz

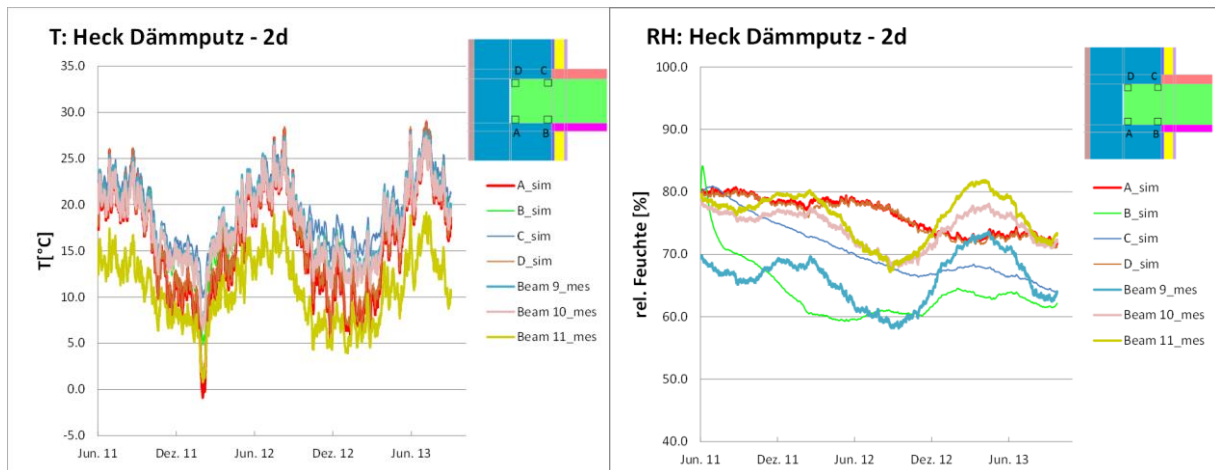


Abbildung 46: Temperaturprofile (links) und Verlauf der relativen Feuchten (rechts) in den Balkenköpfen im Bereich des Heck Dämmputzes.

## IQ-Therm Dämmplatte

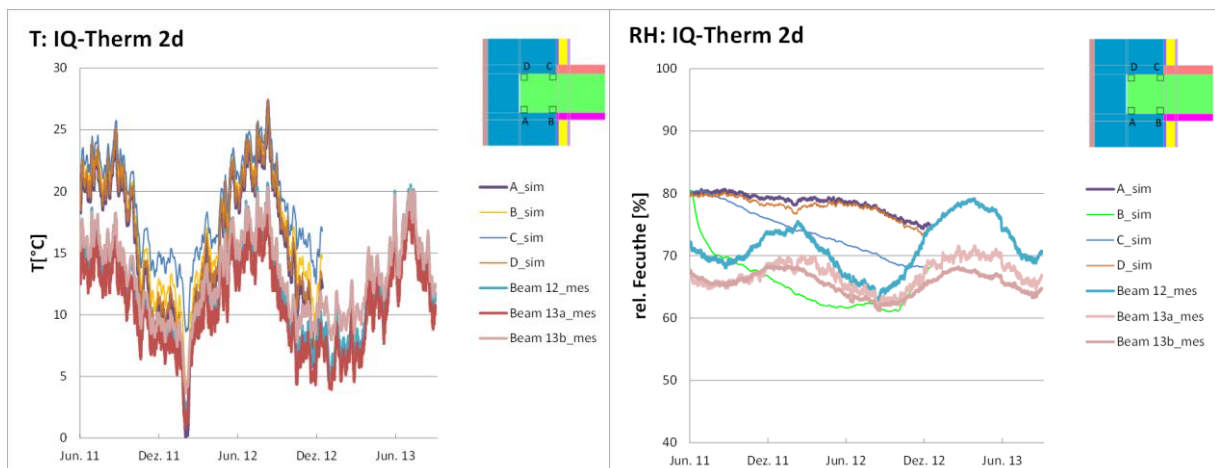


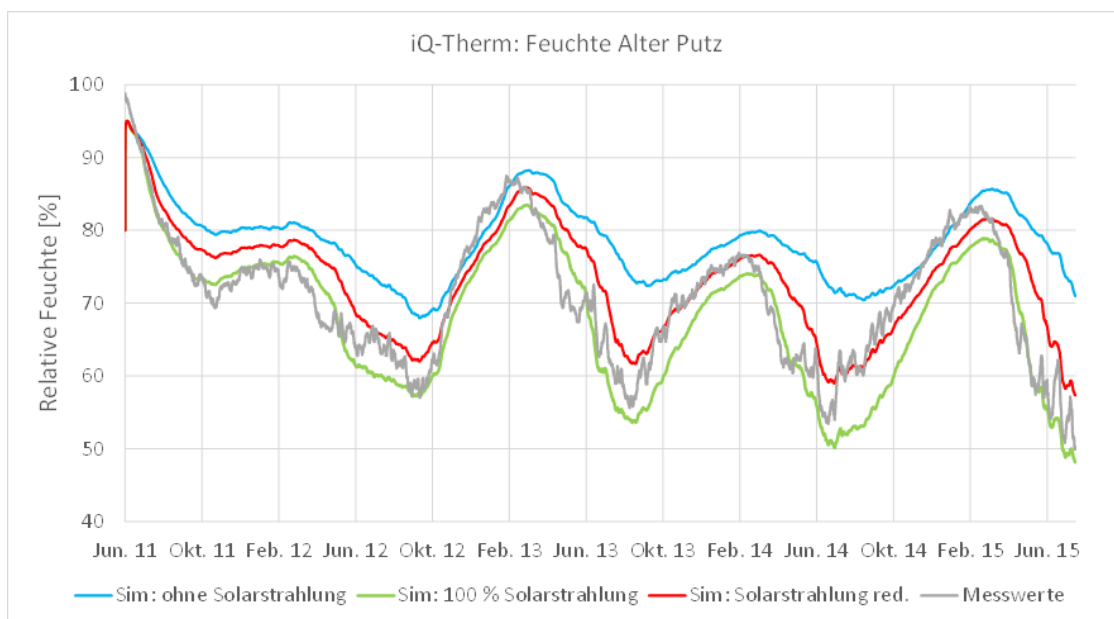
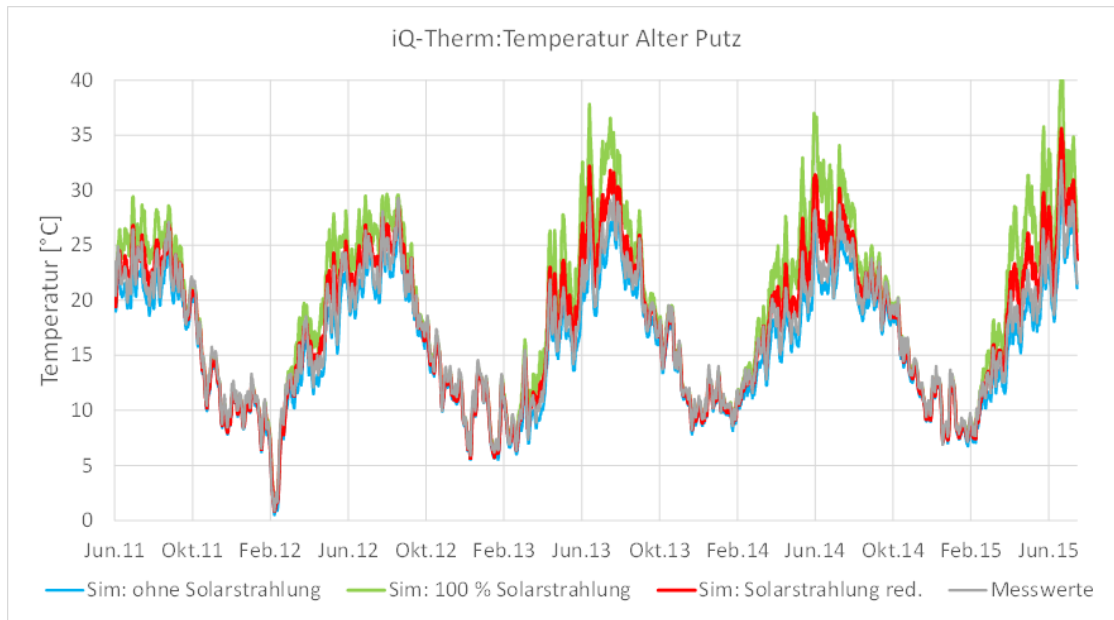
Abbildung 47: Temperaturprofile (links) und Verlauf der relativen Feuchten (rechts) in den Balkenköpfen im Bereich in dem das IQ-Therm-Dämmsystem verbaut wurde.

## 6.4 Vergleich von Messung und Simulation über den gesamten Messzeitraum

Am Ende des Messzeitraums wurden erneut Simulationen des Wärme- und Feuchtetransports für die eindimensionalen Wandaufbauten durchgeführt. Ziel war es, zum einen zu sehen, ob sich nach der ersten Messphase noch Unregelmäßigkeiten aufgetreten sind. Zum anderen wurden in dem Rahmen auch noch einmal Simulationsparameter variiert, so dass die Differenzen zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen noch einmal deutlich kleiner geworden sind. Die Randbedingungen und

Aufbauten entsprechen denen, die zu Beginn dieses Kapitels diskutiert wurden. Betrachtet wurde hier allerdings nur noch die alte Putzebene (hinter Innendämmung).

#### 6.4.1 iQ-Therm, Remmers

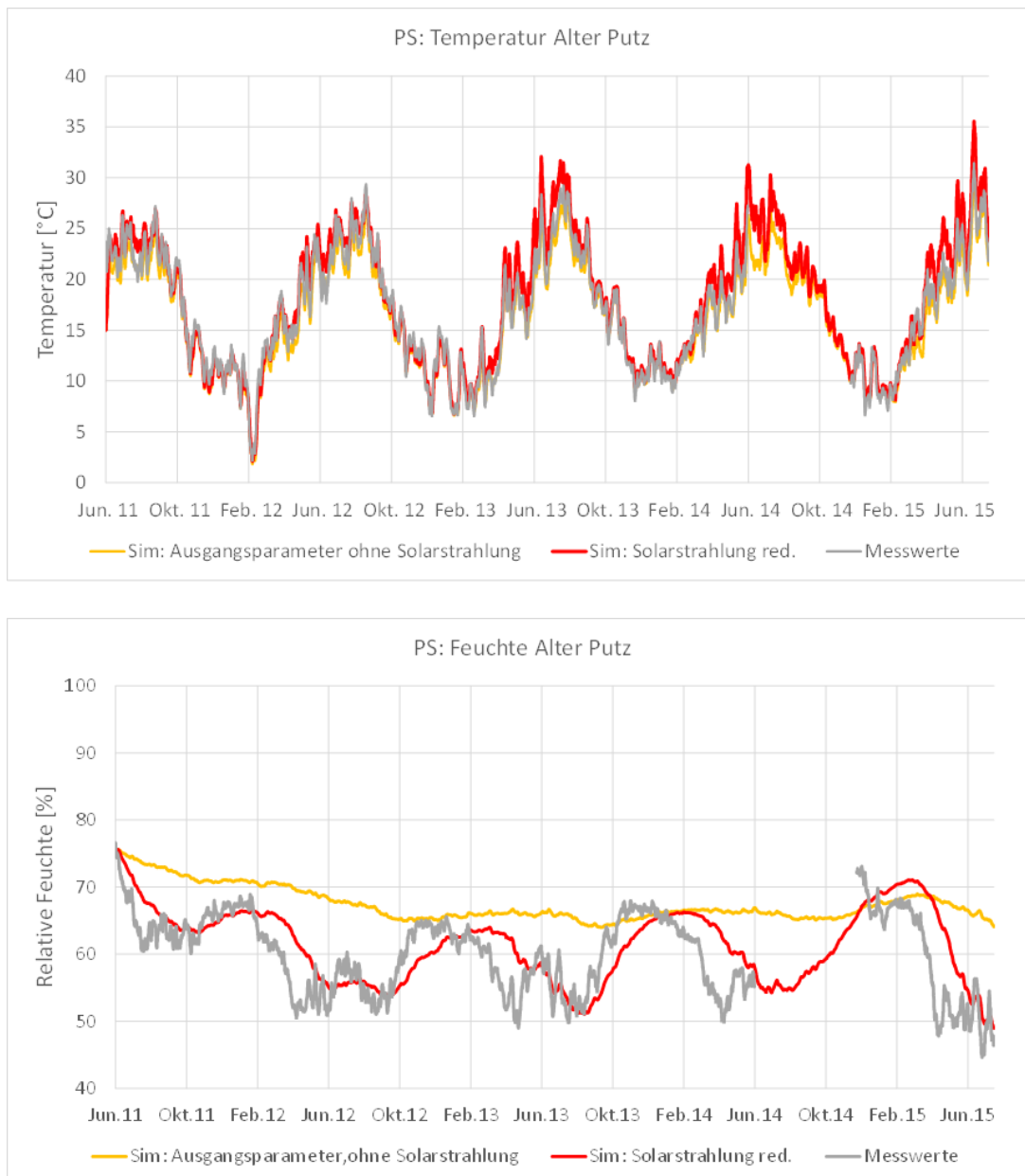


**Abbildung 48: Verlauf der gemessenen und simulierten Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) hinter der Dämmebene bei Einsatz des iQ-Therm Dämmsystems. Bei der Simulation wurde die kurzweilige Solarstrahlung variiert und mit 0, 50 und 100 % der umgerechneten Globalstrahlung angesetzt.**

Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation waren für das iQ-Therm-System bereits bei der Simulation nach der ersten Messphase sehr gut. Nun wurde noch einmal der Einfluss der Solarstrahlung genauer untersucht und sowohl Varianten ohne, mit durch die Verschattung der Fassade reduzierter Solarstrahlung um 50 %

und mit der vollen aus der Globalstrahlung resultierenden Solarstrahlung angesetzt. Bezüglich der Temperatur birgt der Ansatz der vollen Solarstrahlung vor allem im Sommer zu hohe Temperaturen. Wichtiger ist aber der Einfluss auf die relative Ausgleichsfeuchte. Die Simulation mit der reduzierten Solarstrahlung (50 %) ergibt mit Abstand die beste Wiedergabe auch der jährlichen Schwankungen. Hier zeigt sich also die Wichtigkeit eines korrekten Ansatzes der Strahlungswerte.

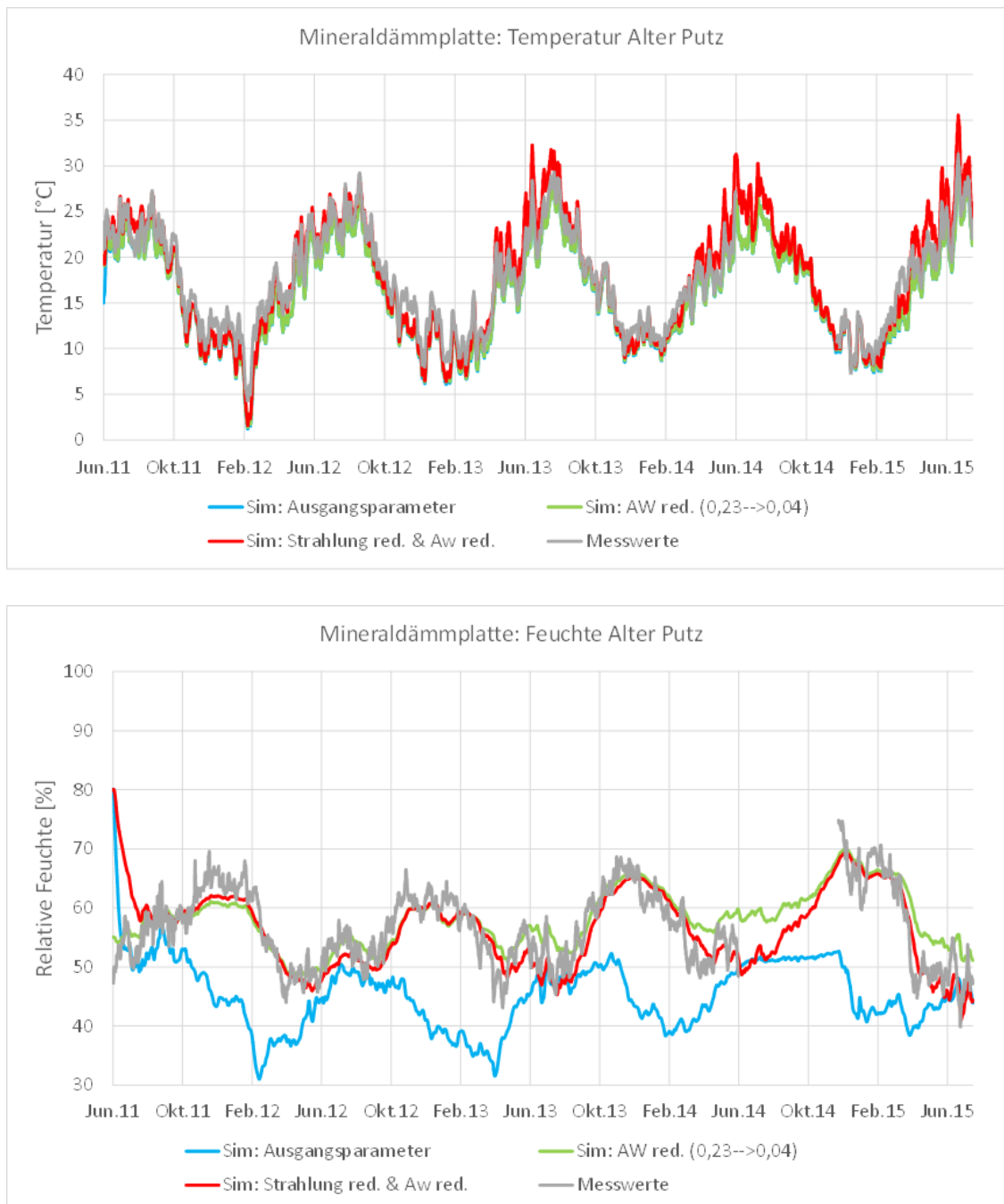
#### 6.4.2 Knauf PS-Hartschaumplatten (InTherm)



**Abbildung 49: Verlauf der gemessenen und simulierten Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) hinter der Dämmebene bei Einsatz des Knauf Dämmsystems mit PS-Platten.**

Auch für die PS-Hartschaumplatten wurden die Varianten ohne Solarstrahlung mit reduzierter Solarstrahlung (50 %) mit den Messwerten verglichen. Auch hier zeigt sich besonders ein Einfluss auf den Feuchteverlauf, der nun bezüglich der absoluten Werte und der Amplitude sehr gut wiedergegeben wird, aber einen leichten Phasenversatz zwischen Simulation (rot) und Messung aufweist.

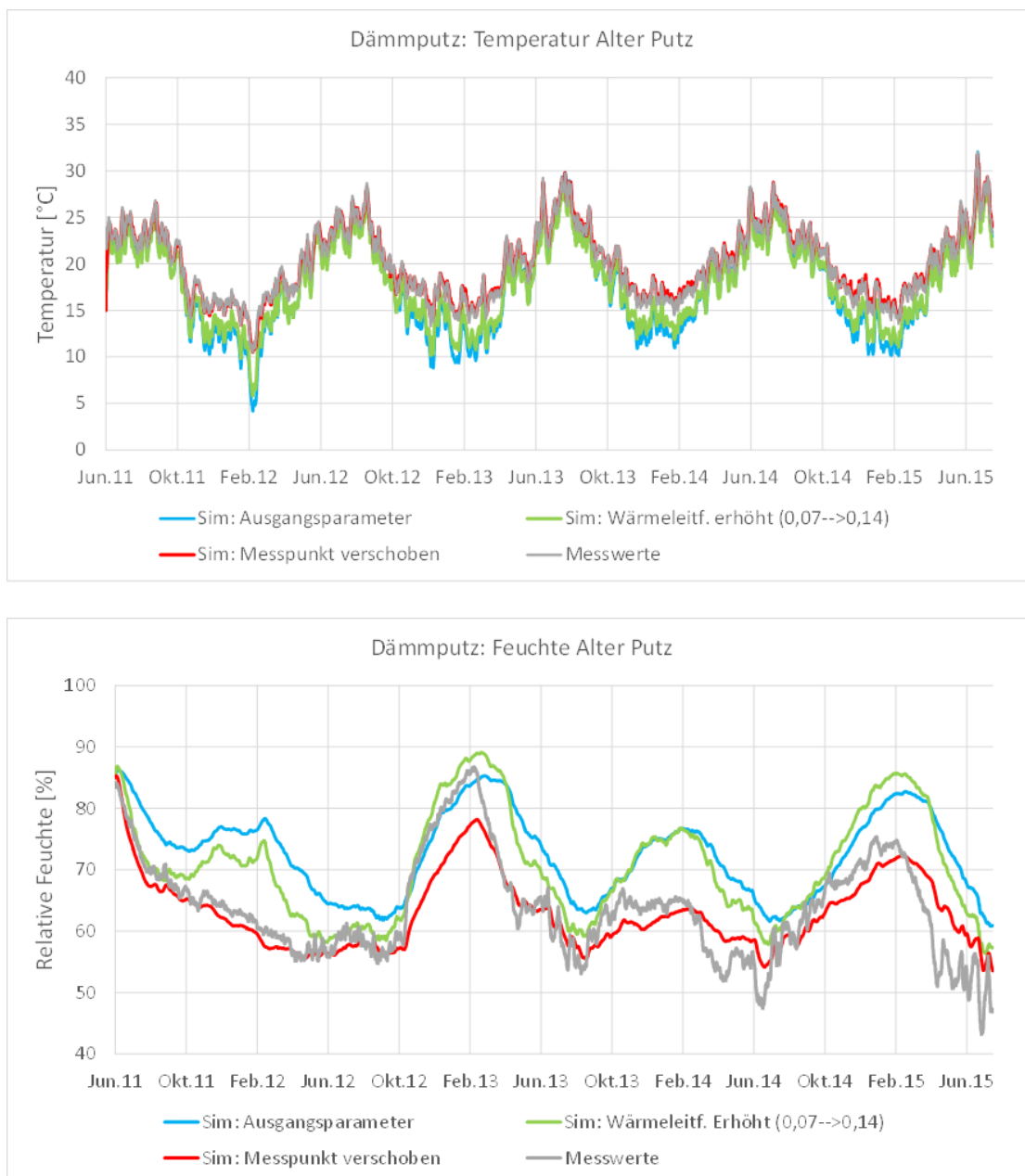
### 6.4.3 HECK Mineralschaumplatte



**Abbildung 50: Verlauf der gemessenen und simulierten Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) hinter der Dämmebene für die Mineralschaumplatten**

Für die HECK-Mineralschaumplatte hatte sich bereits in den ersten Simulationen ergeben, dass die Wasserleitfähigkeit scheinbar deutlich geringer ist als nach den Materialdaten zunächst vermutet. Hier wurde nun der AW-Wert und damit die Flüssigwasserleitfähigkeit um etwas mehr als einen Faktor 5 reduziert (grüne Kurve). Wird zusätzlich die realistischere Strahlungsleistung angesetzt, so ergibt sich eine sehr gute Korrelation zwischen Mess- und Simulationenwerten. Der Einfluss dieser Parametervariationen auf die Temperaturen ist vernachlässigbar gering.

#### 6.4.4 HECK Dämmputz

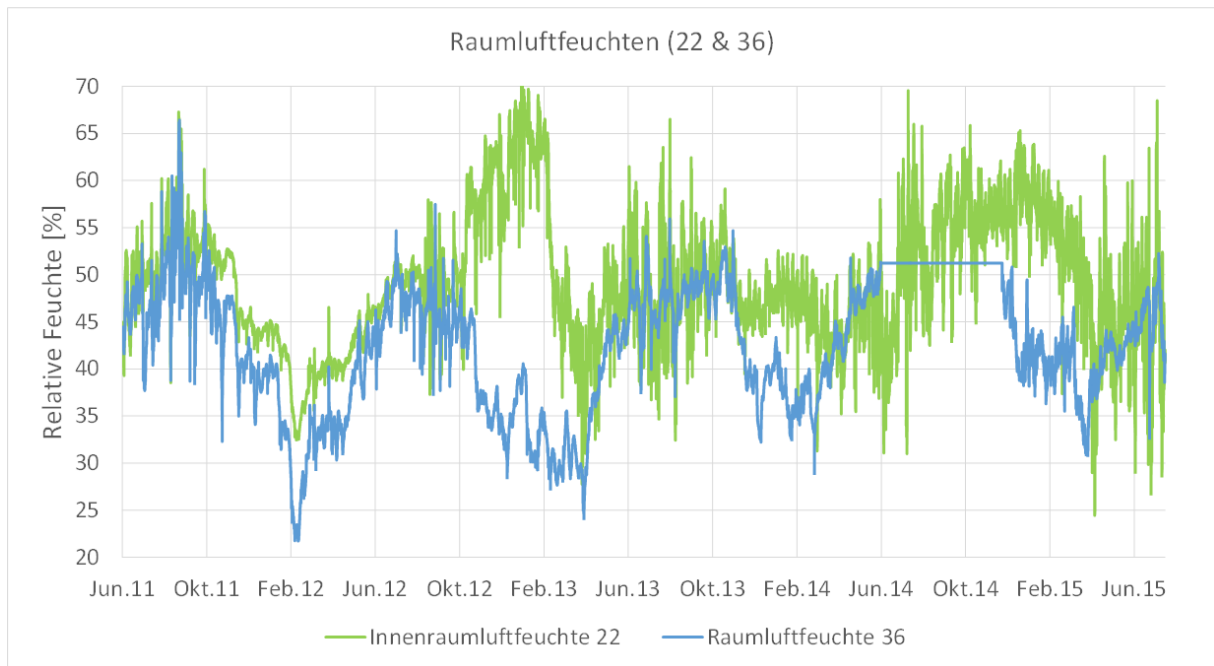


**Abbildung 51: Verlauf der gemessenen und simulierten Temperaturen (oben) und der relativen Feuchte (unten) hinter der Dämmebene bei Einsatz des Dämmsystems mit Dämmputz von HECK.**

Der Heck Dämmputz hatte bereits zuvor wegen der Abweichungen bei den Temperaturen – besonders im kalten Winter - einige Fragen aufgeworfen. Eine mögliche Erklärung wäre eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit, die hier von 0,07 auf 0,14 W/mK erhöht wurde. Alternativ wurde zusammen mit dem Hersteller auch eine Verschiebung des Sensors im Wandaufbau diskutiert. Dies ist möglich, da die Sensoren in der Wand nicht fest verklebt sondern nur mit Nageln geklemmt waren und der Putz aufgesprüht wurde. Die angenommene Verschiebung um 2,5 cm scheint hier als Ergebnisse die beobachteten Differenzen bei dem Temperaturverlauf deutlich zu reduzieren und führt auch zu recht geringen Abweichungen bei der relativen Feuchte. Dies gilt insbesondere für die zweite Hälfte des Messzeitraums.

## **6.5 Vergleich der ID-Systeme bei identischen Innenrandbedingungen**

Nachdem bei diesem Projekt verschiedene Dämmsysteme verbaut und die Entwicklungen der Feuchten gemessen und die Ergebnisse durch Simulation nachvollzogen wurden, bietet sich auch ein direkter Vergleich der Dämmsysteme an. Die Frage, welches das „beste“ Dämmsystem ist, stellt jedem Architekten, Planer oder Bauherren, wenn eine Innendämmmaßnahme umgesetzt werden soll. Aus den gemessenen Ergebnissen ist ein direkter Schluss darauf, welches Innendämmsystem am „besten“ oder „sichersten“ ist, allerdings nicht möglich. Dafür sind die Innenrandbedingungen zu unterschiedlich. Um die unterschiedlichen Einflüsse der verschiedenen Innenklimata auf die Feuchteverläufe in den Dämmsystemen zu eliminieren werden daher die vier ID-Systeme unter identischen Innenrandbedingungen betrachtet. Dazu wurden zwei Innenraumbedingungen mit geringer und hoher Feuchte (Sensorpaare 22 & 36, vgl. Abbildung 52) herausgegriffen und für diese die Feuchteverläufe hinter der Dämmebene berechnet. Die beiden Feuchteverläufe unterschieden sich vor allem im Winter 2012/13, in dem die Raumlufffeuchte im trockeneren Raum (36) während der kalten Jahreszeit deutlich auf ca. 30 % sinkt. Die relative Feuchte im anderen Raum steigt dagegen deutlich auf über 65 %. Deutlich weniger große Unterschiede ergeben sich für den darauffolgenden Winter. In der zweiten Jahreshälfte 2014 weist Sensor 36 einen längeren Ausfall auf, so dass hier durch die Simulationssoftware ein konstantes Raumlufffeuchteniveau angesetzt wird. Für die Simulationen wurden die aus den Anpassungen zwischen Messung und Simulation gefundenen Materialeigenschaften angesetzt.



**Abbildung 52: Raumluchtfeuchten (Sensoren 22 und 36), die für den Vergleich der verschiedenen Dämmsysteme durch Simulation als Randbedingung angesetzt wurden.**

Für die Auswahl des Dämmsystems sind die Temperaturen hinter der Dämmebene, abgesehen von möglicher Frostgefahr, nicht entscheidend. Viel wichtiger sind die Wärmeverluste, die durch die U-Werte der Dämmsysteme in Kombination mit der Bestandwand bestimmt werden. Wie „sicher“ ein Dämmsystem ist, ergibt sich aber nicht aus den Temperaturen, sondern viel mehr aus den Feuchteniveaus. Betrachtet werden sollen hier die Ausgleichsfeuchten, die sich hinter der Dämmung in der alten Putzebene einstellen. Als Anfangsfeuchten wurden für alle Systeme 80 % gewählt. Lediglich für den Kleber des iQ-Therm-Systems wurde eine höhere Anfangsfeuchte von 98 % angesetzt. Diese führt im ersten halben Jahr zu einem Anstieg der Ausgleichsfeuchte hinter dem Dämmsystem.

Die relative Feuchte im äußeren Teil des Mauerwerks (hier nicht gezeigt) schwankt nahezu unabhängig von den Innenbedingungen zwischen 50 % und 70 %. Die Unterschiede durch die verschiedenen ID-Systeme treten vor allem bei den relativen Feuchten in der alten Putzebene zu Tage. Nach dem initialen Austrocknen der Baufeuchte schwankt die relative Feuchte für alle Dämmsysteme zwischen 40 % und 85 %. Die geringste Schwankungsbreite weisen die PS-Verbundplatten auf, bei denen die relative Feuchte zwischen 65 und knapp über 75 % variiert. Grund ist vermutlich der vergleichsweise hohe Dampfdiffusionswiderstand von  $\mu = 50$ . Die größten Schwankungen treten bei den Mineraldämmplatten mit Werten zwischen 40 und 80 % auf. Diese haben einen sehr geringen Dampfdiffusionswiderstand von  $\mu = 5$ , so dass Wasserdampf in der kalten Jahreszeit leicht in die Konstruktion eindringen kann – in der warmen

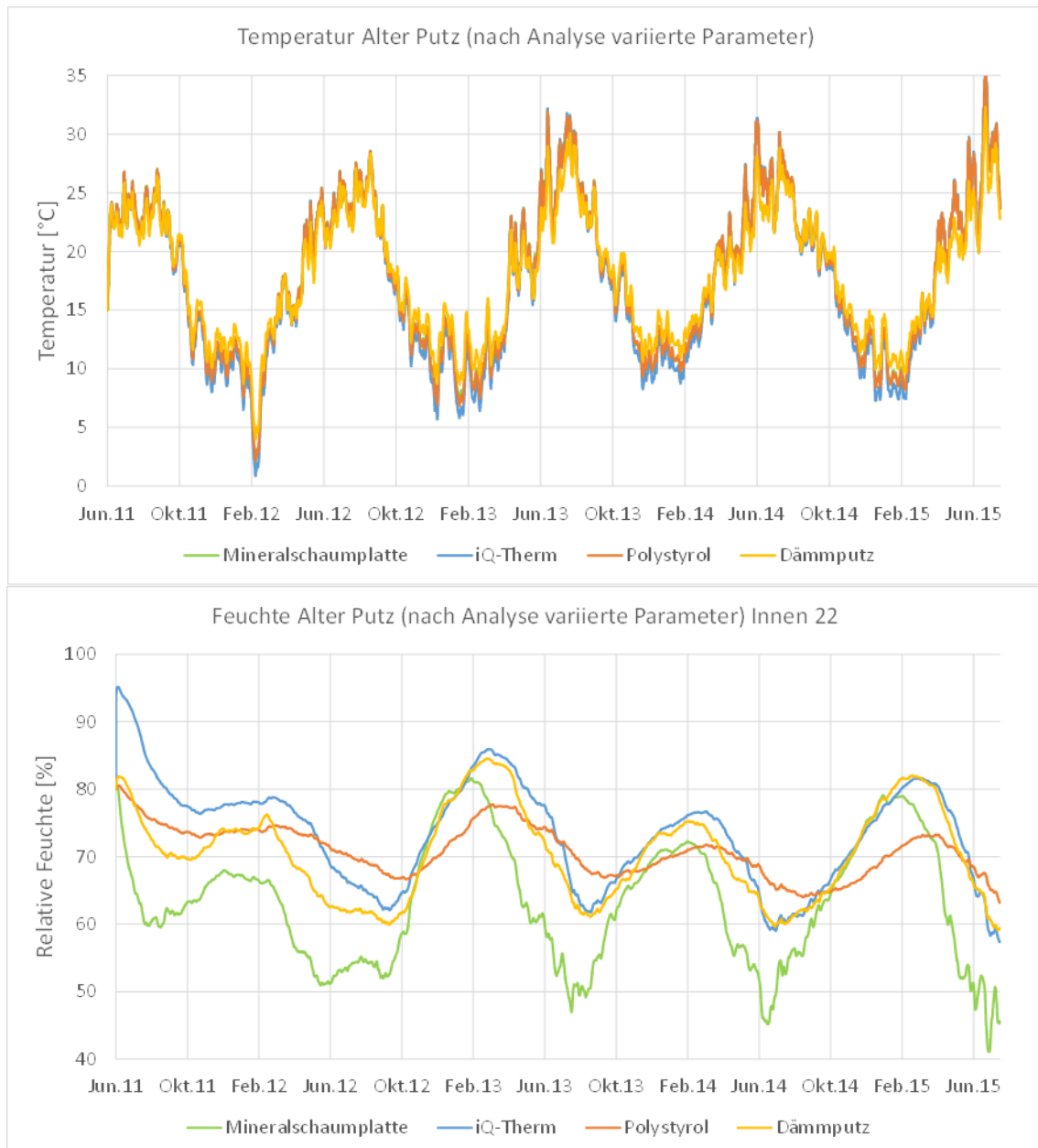


Jahreszeit der Wandaufbau aber auch gut wieder austrocknen kann. Das kapillar aktive System iQ-Therm und der Dämmputz weisen sehr vergleichbare Feuchtelevel hinter der Dämmebene von 60 bis 85 % auf.

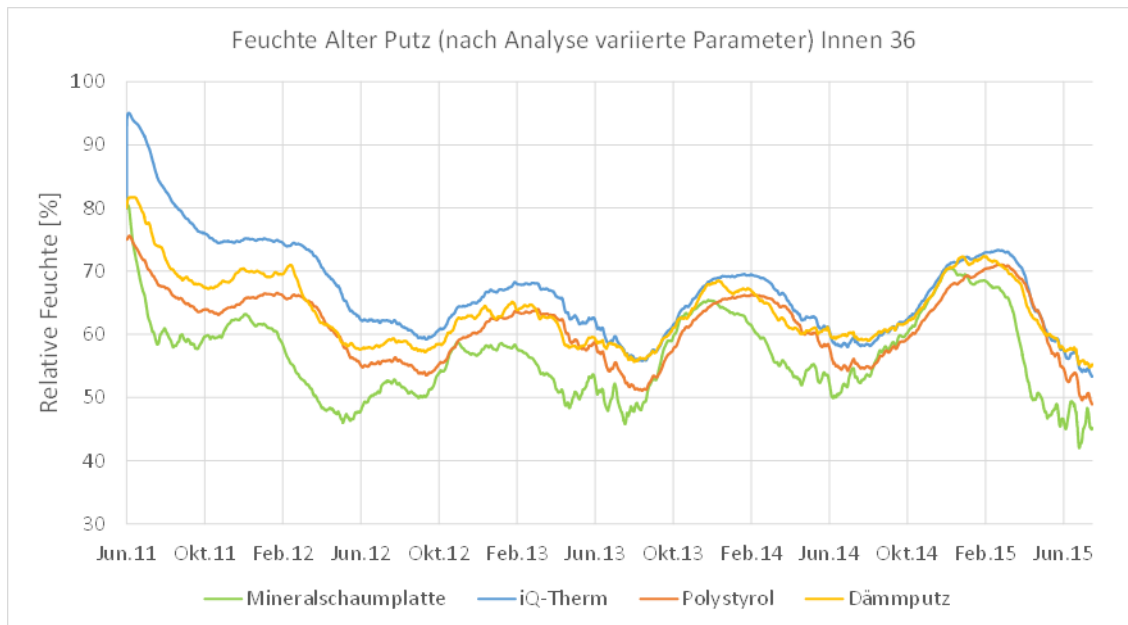
Betrachtet man die über dem Simulationszeitraum auftretenden relativen Feuchten hinter der Dämmung (alte Putzebene), so kann festgehalten werden, dass bei keinem der Systeme eine Gefahr von Schimmelbildung besteht. Es treten zwar teils Ausgleichsfeuchten von über 80 % auf, dies allerdings nur für einen Zeitraum von einigen Monaten und anschließend folgt die Trocknung auf lediglich 60 %.

Die Ergebnisse für das trockenere Innenraumklima (Sensor 36) zeigen sehr ähnliche Verläufe der Ausgleichsfeuchten hinter der Dämmebene (Abbildung 54), wie für das feuchtere Innenraumklima. Nach dem Einschwingen betragen die maximalen Abweichungen zwischen den Dämmsystemen weniger als 10 %. Durch die geringeren Innenraumfeuchten liegen die maximalen Feuchten lediglich noch bei 70 %. Auffällig ist die lange Trocknungszeit des iQ-Therm-Dämmsystems, das mehr als ein Jahr deutlich über den übrigen Feuchten liegt.

Soll aus den Simulationsergebnissen eine Empfehlung abgegeben werden, so fällt die Wahl entweder auf die PS-Verbundplatten, die die geringsten maximalen Ausgleichsfeuchten aufweisen, oder auf die Mineralewolleplatte. Diese erlaubt zwar auch Feuchtelevel in der Größenordnung von 80 % im feuchten Winter hat aber offensichtlich das größte Trocknungspotential – trocknet also am schnellsten wieder aus. Dies ist besonders dann wichtig, wenn unvorhergesehene Feuchteinträge z.B. durch erhöhte Schlagregenbelastung durch Defekte in der Außenhaut auftreten. Die Unterschiede sind allerdings eher gering. Wichtiger als die Wahl des Dämmsystems scheint nach diesem Vergleich die Erstellung und Umsetzung eines Lüftungskonzepts (am besten mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, wie es hier umgesetzt wurde). Deutlich betont werden soll an dieser Stelle noch, dass bei Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes bei Altbauten dies grundsätzlich immer gilt.



**Abbildung 53: Überblick über Temperatur- und Feuchteverläufe an den Messpunkten in der alten Putzebene für die Innenraumbedingungen des Sensors 22 (mit vergleichsweise hohen Raumlufffeuchten). Für die verschiedenen Innendämmsysteme wurden die sich aus dem Mess-Sim-Vergleich ergebenden Parameter eingesetzt.**



**Abbildung 54: Relative Ausgleichsfeuchten im Bereich der alten Putzebene hinter den Dämmsystemen im Vergleich bei trockenen Innenraumbedingungen (Sensor 36).**

## 7 Bewertung der Dämmsysteme nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Für die verschiedenen Dämmsysteme wurde auch die Wirtschaftlichkeit der Dämmmaßnahmen betrachtet: Dazu wurden die Energiekosteneinsparungen, die durch die zusätzliche Dämmung erreicht werden, mit den Investitionskosten in Form einer Lebenszyklusberechnung verglichen. Betrachtet wurden die Energieeinsparungen und Kosten pro Quadratmeter Außendämmung ohne eine komplette Energiebilanz aufzustellen. Bei diesen vereinfachten Betrachtungen wurden keine Maßnahmen zur Reduktion von Wärmebrücken wie die Laibungsdämmung o.ä. betrachtet, auch wenn diese aus feuchtetechnischer Sicht auf jeden Fall erfolgen sollten. Als Lebensdauer wurden für alle Dämmsysteme 30 Jahre angenommen. Ein Vergleich der Barwerte von Investitionen und Einsparungen für einen Zeitraum von 30 Jahren zeigt, dass alle Systeme nicht nur energetische, sondern auch finanzielle Einsparungen gegenüber dem Bestand bieten. Bei einem Realzinssatz von 2 % und Wärmekosten von 10 Cent/kWh [AkkP42] stehen dem Barwert der Energiekosteneinsparungen von 192 bis 215 €/m<sup>2</sup> Investitionskosten zwischen 45 und 154 €/m<sup>2</sup> [Zaman2010] jeweils bezogen auf die Fläche der Außendämmung entgegen (s. Tabelle 4).

Der Wärmedämmputz wurde nach Abschluss des Versuchsgebäudes in allen Gebäuden der Hohenzollernhöfe eingesetzt. Auffällig ist, dass die Kosten deutlich geringer sind als beim Versuchsgebäude, durch welche sich dann auch deutliche Lebenszykluskostenersparnisse ergeben. Auch bei den anderen Systemen sind, wenn größere Mengen verarbeitet werden, durch Skaleneffekte geringere Kosten zu erwarten.

Dämmsystem	U-Wert System [W/(m <sup>2</sup> K)]	Energieeinsparung [kWh/m <sup>2</sup> a]	Energiekosten-einsparung [€/m <sup>2</sup> ]	Investitionskosten [€/m <sup>2</sup> ]	Lebenszykluskostenersparnis [€/m <sup>2</sup> ]
kapillaraktive Minerale-dämmplatte	0.464	94.5	212	105	107
kapillaraktive PUR-Hartschaumplatte	0.442	96.1	215	129	86
Wärmedämmputz	0.582	85.7	192	154	38
Wärmedämmputz (wie abgerechnet)	0.582	85.7	192	52	140
PS-Verbundplatten	0.499	91.9	206	45	161

Tabelle 4: Eingesparte Energie, deren Kosten und die Investitionskosten für die verschiedenen Dämmsysteme pro Quadratmeter Außenwandfläche bei einem Realzinssatz von 2 % und Kosten von 0,10 €/kWh Wärme. Die Energiekosten für die Bestandsvariante mit einem U-Wert von 1,73 W/m<sup>2</sup>K betragen über den Lebenszyklus 129,-€.



Bezüglich der Wirtschaftlichkeit sollte das System mit der größten Lebenszykluskostenersparnis gegenüber dem Bestand gewählt werden. Hier stellen sich die PS-Verbundplatten mit einer Lebenszykluskostenersparnis über 30 Jahre von 160 € pro Quadratmeter als aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu empfehlen heraus. Wichtig ist aber die Feststellung, dass alle Systeme neben der Einsparung von Energie und einem deutlichen Komfortgewinn für die Nutzer (weniger Zuglufterscheinungen, gleichmäßigere Raumlufttemperaturen) auch wirtschaftlich vorteilhaft sind. Es spricht also alles dafür, Innendämmmaßnahmen umzusetzen.

## 8 Ableitung von Planungsempfehlungen für vergleichbare Sanierungsmaßnahmen

Wesentliche allgemeine Aspekte bei der Umsetzung von Innendämmmaßnahmen sind:

- die Sicherstellung eines ausreichenden **Schlagregenschutzes**. Im vorgestellten Projekt konnten 2 cm Wärmedämmputz und ein neuer, wasserabweisender Außenputz aufgebracht werden. Auch eine solch dünne Außendämmung reduziert mögliche Gefahren deutlich. Ist eine solche Maßnahme nicht möglich, so sollte zumindest die Außenoberfläche vollständig intakt sein (keine größeren Risse etc.). Gerade für Sichtmauerwerk ist eine Hydrophobierung oft die einzige mögliche Maßnahme, um einen hinreichenden Schutz gegen Feuchte von außen herzustellen.
- die Realisierung von **Begleitdämmung** z.B. für Fensterlaibungen, damit sich auch bei niedrigen Außentemperaturen kein Kondensat an kalten Innenoberflächen bilden kann.
- die Realisierung **eines luftdichten, raumseitigen Anschlusses**, wodurch die Hinterströmung der Dämmung mit feucht-warmer Raumluft verhindert wird. Dies gilt insbesondere bei Holzbalkendecken.
- die Installation einer **kontrollierten Wohnungslüftung** (am besten Lüftungsanlage mit WRG) im Zuge der Modernisierungsmaßnahmen, wodurch die Raumluftfeuchten auf ein unkritisches Niveau begrenzt werden kann. Zur Sicherung eines einwandfreien Betriebs der Lüftungsanlage während des Winterhalbjahrs, empfiehlt es sich, die Wartungsarbeiten möglichst im Herbst durchzuführen (zu Beginn bzw. noch vor der Heizperiode).

Planungsempfehlungen für die Realisierung des **luftdichten Anschlusses bei Holzbalkendecken**:

Die sicherste Variante zur Erzielung eines luftdichten Anschlusses ist alle Balkenköpfe freizulegen und dann jeden Balkenkopf an die luftdichte Ebene einzeln anzudichten. Dies ist jedoch leider auch ein sehr aufwändiges Vorgehen. Im vorliegenden Projekt wurde ein vereinfachtes Luftdichtheitskonzept umgesetzt: der Anschluss der Innendämmung an Boden, Decke und Innenwände erfolgte mit einem Butyldichtband. Lediglich ein an die Außenwand angrenzender Streifen des Estrichfußbodens wurde entfernt, um den Zustand der Balken beurteilen zu können. Dieses Verfahren kann allerdings nicht ungeprüft bei anderen Projekten angewandt werden. Die Frage, die sich stellt, ist, ob dieses vereinfachte Luftdichtheitskonzept auch auf vergleichbare Sanierungsmaßnahmen übertragbar ist.

Für die Umsetzung des vereinfachten Anschlusses sollten zumindest folgende Voraussetzungen vorliegen:

- Die Aufbauten von Boden, Decken und Innenwänden müssen vollflächig luftdicht sein. Nicht für alle Holzbalkenkonstruktionen führt diese Lösung zum gewünschten Erfolg. Wenn der raumseitige Abschluss der Holzbalkendecke an sich nicht luftdicht ist (z.B. Holzdielung) wird von dem vereinfachten Verfahren abgeraten.
- Es wird empfohlen, wie im vorliegenden Projekt, den Fußbodenaufbau über den Holzbalken, zumindest in einem Abstand von ca. 50 cm zur Außenwand hin freizulegen. Dies ermöglicht eine Begutachtung der Balken (und gegebenenfalls Ausbesserung).
- Der luftdichte Anschluss kann durch Unterdruckthermografie nachgewiesen werden. Bezüglich des Langzeitverhaltens des Luftdichtheitskonzepts kann derzeit keine Aussage getroffen werden.
- Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen und der damit verbundenen Verbesserung der Luftdichtheit wird die Installation einer kontrollierten Wohnungslüftungsanlage (am besten Lüftungsanlage mit WRG) empfohlen. Die Funktion der Begrenzung der Raumluftfeuchte hat im Zusammenhang mit den erschwerten Anschlussbedingungen der luftdichten Ebene einen noch höheren Stellenwert.

## Literatur

- [AkkP32] *Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung*; Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2005.
- [AkkP42] *Ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen*; Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V; Passivhaus Institut; Darmstadt 2013.
- [Bode 2010] Bode, J., Hygrothermische Berechnung für die Holzbalkenköpfe in der innen gedämmten Außenwand, Gutachten 2009 825-1 vom 01.02.2010, BBS Ingenieurbüro, Wolfenbüttel, im Auftrag der LUWOG, 2010
- [Peper 2014] Peper, S., Bangert, A.; Bastian, Z.; Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene, Projektbericht 3enCult, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2014
- [Zaman 2010] Zaman, A., Hohenzollernhöfe Sanierung einer denkmalgeschützten Wohnanlage mit Passivhaus-Komponenten, LUWOG, Tagungsband 14. internationale Passivhaustagung 2010, Dresden, Passivhaus Institut, Darmstadt 2010
- [Reising 2009] Reisinger, K. et al, Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holz – Vergleich marktgängiger Messgeräte, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Berichte aus dem TFZ 16, Straubing, 2009
- [Hasper 2010] Hasper, Wolfgang; Kaufmann, Berthold; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Speichergebäudes mit aufgesprühter ZelluloseInnendämmung. Bauphysikalische Begleitmessung. IEA SHC Task 37. Passivhaus Institut Darmstadt, 2010
- [Janetti2014] Bianchi Janetti, M.: Assessment of the moisture risk in constructions including convection inside air cavities; 10th Nordic Symposium on Building Physics; Lund; 2014
- [Lerch2011] Dokumentation des Versuchsbaues Fichtestrasse 20; Lerch, Helmut; Heidelberg, 2011
- [MASEA] Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung, MASEA Datenbank; <http://www.masea-ensan.de/>
- [Nicolai2010] DELPHIN: Simulation program for coupled heat, air, moisture, salt and VOC transport. Available at: [www.bauklimatik-dresden.de](http://www.bauklimatik-dresden.de)
- [Sedlbaur2001] Sedlbaur, Klaus; Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen; Dissertation; Universität Stuttgart; 2001





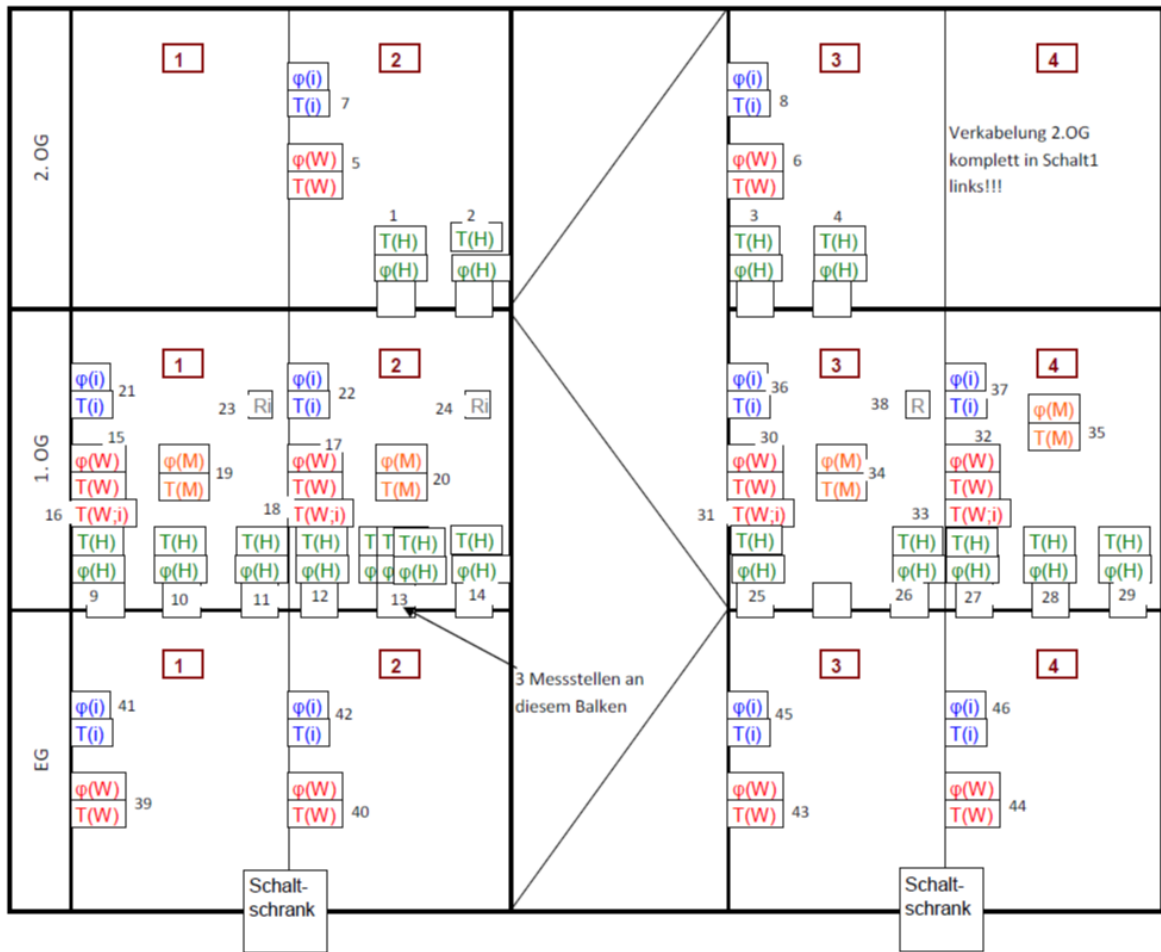
- [Schaube1986] Schaube, H.; Werner, H.; IBP-Mitteilung 13, Nr.109, 2 S. : Abb.,Lit.; ISSN: 9990-1390; 1986
- [Zimen] Wettermessdaten vom Zimen-Luftmessnetz des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Ludwigshafen-Mundenheim.
- [Kehl2013] Kehl, D.; Ruisinger, U.; Plagge, R., Gruenewald, J.; Holzbalkenköpfe bei innengedämmten Mauerwerk – Ursachen der Holzzerstörung und Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen; 2. Internat. Innendämmkongress; Dresden, 2013.

# Anhang

## Anhang 1: Tabellarische Übersicht der eingesetzten Messtechnik

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
<b>Untersuchung Wandaufbau</b>					
Luftfeuchte, Temperatur	Im Wandaufbau und in einer Unterputzdose (Raumluft)	% rF / °C	Miniatur Feuchte/ Temperatur Messumformer	E+E Elektronik	+/- 3% r.F. (0...95%rF) +/- 0,3 K (bei 20C°)
Oberflächentemperaturen	Wand raumseitig	°C	Pt 100	Fa. TC Direkt	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
<b>Untersuchung der Holzfeuchte</b>					
Holzfeuchte	Balkenkopf	M%	hochohmische Widerstandsmessung	Fuva	< 1 M%
<b>Untersuchung der Wetterdaten</b>					
Niederschlagsmenge	Außenwand	Liter/m <sup>2</sup> Wandfläche	Niederschlags-sensor	Fa. Thies	Keine Angaben
Windrichtung	Wetterstation auf Nachbargebäude	°	Windrichtungsgeber-compact	Fa. Thies	+/- 5° (0...360°)
Windstärke	Wetterstation auf Nachbargebäude	m/s	Windgeber-compact	Fa. Thies	Keine Angaben
Luftfeuchte, Temperatur	Wetterstation auf Nachbargebäude	% rF / °C	Hygro-Thermo-Geber-compact	Fa. Thies	+/- 3% r.F. +/- 0.3 K
Globalstrahlung	Wetterstation auf Nachbargebäude	W/m <sup>2</sup>	Pyranometer CM11	Kipp& Zonen	Keine Angaben

## Anhang 2: Sensorbezeichnung und Sensorpositionen



1	D05 Heck-Dämmputz	$\phi(H)$	Holzfeuchtemessung Balkenkopf
2	D03 IQ_Therm	$T(H)$	Temperaturmessung Balkenkopf
3	D04 PS-Hartschaumplatte	$\phi(W)$	Feuchtemessung Wand unter Isolierung (Ebene alter Innenputz)
4	D01 Heck-Dämmplatte	$T(W)$	Temperaturmessung Wand unter Isolierung (Ebene alter Innenputz)
		$T(W;i)$	Oberflächentemperatur neue Innenwand
R	Niederschlagssensor Fassade (Signal j/n)	$\phi(i)$	Feuchtemessung Raum
R <sub>i</sub>	Niederschlagssensor Fassade (Intensität)	$T(i)$	Temperaturmessung Raum
		$\phi(M)$	Feuchtemessung Mauerwerk nahe Außenputz
		$T(M)$	Temperaturmessung Mauerwerk nahe Außenputz



### Anhang 3: Berechnungen der U-Werte für die Bestandskonstruktion sowie die ausgeführten Innendämmvarianten

#### Passivhaus-Projektierung: U - WERTE DER BAUTEILE

Objekt: **Hohenzollern Höfe**

Keilförmige Bauteilschichten (Gefälledämmung), ruhende Luftschichten und unbeheizte Dachböden

-> Hilfsmittel rechts

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung					Innendämmung?
1	Bestandswand					<input type="checkbox"/>
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0.13			
		außen R <sub>se</sub>	0.04			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. Außenputz	0.750					10
2. Sandstein	1.000					380
3. Außenputz	0.750					10
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
100%						40.0 cm
U-Wert-Zuschlag		W/(m <sup>2</sup> K)		U-Wert:		1.734 W/(m <sup>2</sup> K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung					Innendämmung?
2	HECK Dämmputz					<input checked="" type="checkbox"/>
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0.13			
		außen R <sub>se</sub>	0.04			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. Außenputz	0.750					10
2. Dämmputz	0.070					20
3. Sandstein	1.000					380
4. Dämmputz	0.070					60
5. Innenputz	0.750					10
6.						
7.						
8.						
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
100%						48.0 cm
U-Wert-Zuschlag		W/(m <sup>2</sup> K)		U-Wert:		0.582 W/(m <sup>2</sup> K)

Bauteil Nr.	Bauteil-Bezeichnung					Innendämmung?
3	HECK Mineralschaumplatte					<input checked="" type="checkbox"/>
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>si</sub>	0.13			
		außen R <sub>se</sub>	0.04			
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. Außenputz	0.750					10
2. Dämmputz	0.070					20
3. Sandstein	1.000					380
4. HECK Kleber	0.310					15
5. HECK Mineralschaumplat	0.040					50
6. Mineralischer Putz	0.750					5
7.						
8.						
Flächenanteil Teilfläche 1		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
100%						48.0 cm
U-Wert-Zuschlag		W/(m <sup>2</sup> K)		U-Wert:		0.464 W/(m <sup>2</sup> K)



Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung  
**4** **Remmers IQ-Therm**

Innendämmung? **ja**

Wärmeübergangswiderstand [m<sup>2</sup>K/W] innen R<sub>si</sub> **0.13**  
 außen R<sub>sa</sub> **0.04**

Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. <b>Außenputz</b>	<b>0.750</b>					<b>10</b>
2. <b>Dämmputz</b>	<b>0.070</b>					<b>20</b>
3. <b>Sandstein</b>	<b>1.000</b>					<b>380</b>
4. <b>IQ Fix</b>	<b>0.497</b>					<b>15</b>
5. <b>IQ Therm</b>	<b>0.037</b>					<b>50</b>
6. <b>IQ Top</b>	<b>0.480</b>					<b>15</b>
7.						
8.						

Flächenanteil Teilfläche 1: 100%      Flächenanteil Teilfläche 2:       Flächenanteil Teilfläche 3:

U-Wert-Zuschlag  W/(m<sup>2</sup>K)      U-Wert: **0.442** W/(m<sup>2</sup>K)

Summe **49.0** cm

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung  
**5** **PS-Hartschaum**

Innendämmung? **ja**

Wärmeübergangswiderstand [m<sup>2</sup>K/W] innen R<sub>si</sub> **0.13**  
 außen R<sub>sa</sub> **0.04**

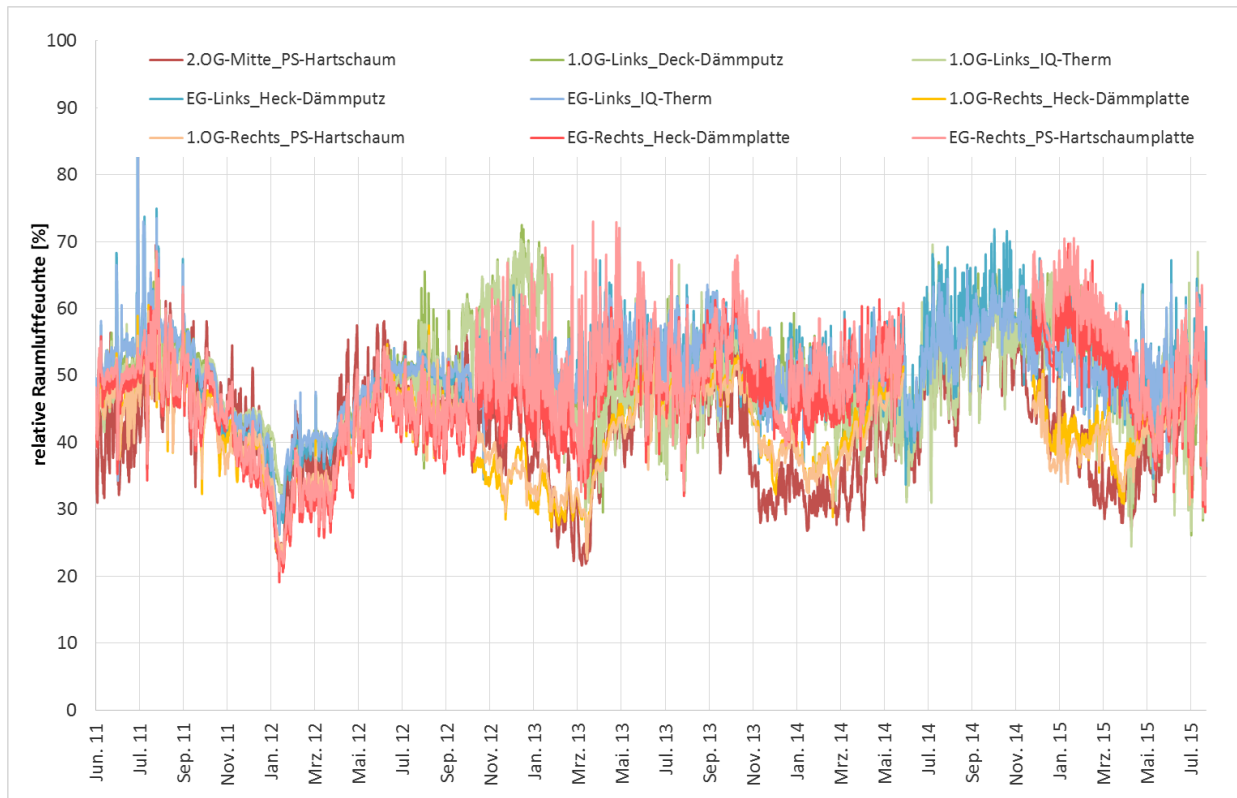
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. <b>Außenputz</b>	<b>0.750</b>					<b>10</b>
2. <b>Dämmputz</b>	<b>0.070</b>					<b>20</b>
3. <b>Sandstein</b>	<b>1.000</b>					<b>380</b>
4. <b>Kleber</b>	<b>0.700</b>					<b>20</b>
5. <b>PS-Hartschaum</b>	<b>0.040</b>					<b>40</b>
6. <b>Gipskarton</b>	<b>0.200</b>					<b>25</b>
7.						
8.						

Flächenanteil Teilfläche 1: 100%      Flächenanteil Teilfläche 2:       Flächenanteil Teilfläche 3:

U-Wert-Zuschlag  W/(m<sup>2</sup>K)      U-Wert: **0.499** W/(m<sup>2</sup>K)

Summe **49.5** cm

## Anhang 4: Raumlufffeuchten in den an die Innendämmsysteme angrenzenden Räumen



Große Unterschiede in den Raumlufffeuchten kommen dadurch zustande, dass die Wohnungen erst mit der Zeit belegt wurden und dass eine der Wohnung als nur sehr wenig belegtes Verkaufsbüro und Vorführwohnung genutzt wurde.