



**PASSIV  
HAUS  
INSTITUT**

*Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstr. 44-46  
D64283 Darmstadt*



## **Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Speichergebäudes mit aufgesprühter Zellulose-Innendämmung**



### **Bauphysikalische Begleitmessung**

**Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen  
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Advanced Housing Re-  
novation with Solar & Conservation' der Internationalen  
Energie Agentur IEA:  
IEA SHC Task 37**

**Projekttitle: Energieeffiziente und solare Sanierung von Wohngebäuden**

**Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi  
vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH**

**Darmstadt; 2010**

# Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Speichergebäudes mit aufgesprühter Zellulose-Innendämmung

## Endbericht IEA SHC TASK 37 Subtask C

**Autoren:**

Dipl. Ing. Wolfgang Hasper  
Dr. Berthold Kaufmann  
Dr.-Ing. Rainer Pfluger  
Prof. Dr. Wolfgang Feist

**Unter Mitarbeit von:**

Henning Aust

**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, 2010**

Dieser Bericht entstand im Unterauftrag des Fraunhofer Institutes für solare Energiesysteme ISE, Freiburg im Rahmen des

Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energie Agentur IEA, **Task 37 'Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation'**.

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im **Subtask C: Design und Konzepte**

Die nationale Beteiligung wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi Vertreten durch den Projektträger BEO Forschungszentrum Jülich GmbH

Förderkennzeichen 032 27271B

Wir danken der Fa. Isocell, Hr. Lackner, für die Kostenübernahme der im Wandaufbau verbleibenden Sensoren und der Europäischen Akademie e.V., insbesondere Prof. Dr. Charles Elworthy, für große Hilfsbereitschaft und Unterstützung.

**Haftungsausschluss:** Die Informationen in dieser Schrift wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Eine Haftung für den Inhalt kann jedoch trotz sorgfältiger Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden. Dies gilt insbesondere für Detailzeichnungen, die in jedem Fall als Prinzipskizzen zu verstehen sind, in denen nicht immer alle baulich relevanten Komponenten enthalten sein müssen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>VORSTELLUNG DES GEBÄUDES, SANIERUNGSMABNAHMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DÄMMSYSTEM .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>DETAILGESTALTUNG.....</b>	<b>9</b>
	Durchdringungen .....	10
	Fenstereinbau .....	13
<b>5</b>	<b>FEUCHTESCHUTZ.....</b>	<b>15</b>
	Aufsteigende Feuchte .....	15
	Feuchte aus dem Innenraum .....	16
	Schlagregen .....	16
<b>6</b>	<b>BEGLEITMESSUNG.....</b>	<b>18</b>
	<b>Messkonzept.....</b>	<b>18</b>
	Aufbau der Messtechnik.....	18
	Messtellen.....	20
	Auswertezeitraum .....	21
	Wetterdaten .....	21
	<b>Messdatenauswertung.....</b>	<b>23</b>
	Wetterdaten im Auswertezeitraum .....	23
	Schlagregenbelastung im Auswertezeitraum.....	26
	Innenraumlufttemperatur, -feuchte, Gebäudenutzung .....	28
	Oberflächentemperaturen .....	30
	Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau – Regelfläche .....	38
	Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau – Fensteranschlüsse .....	43
	Holzfeuchte .....	49
	Wärmestrom .....	55
<b>7</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>60</b>
	Monatsdiagramme der Windstärken und –richtungen der Station Schwedt/O.	60
	U-Wert Berechnung Aussenwand Obergeschoss .....	63

## 1 Zusammenfassung

Ein diffusionsoffenes Innendämmsystem aus aufgespritzten, leimgebundenen Zelluloseflocken mit innenseitiger Putzschicht wurde messtechnisch begleitet. Verläufe von Temperaturen und Ausgleichsfeuchten verschiedener Bauteilschichten wurden in Regelflächen und an Fensteranschlüssen erfasst. Daneben wurde die Holzfeuchte ausgewählter Konstruktionshölzer gemessen. Das Gebäude befand sich während des untersuchten Zeitraumes intermittierend in Benutzung.

Der Verlauf der Ausgleichsfeuchte in der Grenzschicht von Mauerwerk und Innendämmschicht zeigte über lange Zeiträume Werte deutlich über 80 %. Ein signifikant unterschiedliches Verhalten von Regelfläche und Fensteranschluss konnte nicht beobachtet werden, obwohl sich beide Bereiche in der Dämmstärke deutlich unterscheiden (80 mm reguläre Dämmstärke, in Laibungsbereichen 40 mm Sollstärke). Eine bleibende Auffeuchtung über den Jahreszyklus konnte nicht festgestellt werden, es bestehen vielmehr Hinweise auf eine fortschreitende Austrocknung.

Das Dämmsystem bestätigt somit seine Funktionsfähigkeit im Jahreszyklus, auch im Bereich der in dieser Untersuchung mit betrachteten Fensteranschlüsse. Gleichzeitig zeigen die gemessenen, hohen Feuchten, dass eine Schutzbehandlung gegen Schimmelpilzbefall, wie sie in Form der zugesetzten Borate bei dem untersuchten Produkt besteht, für die dauerhafte Haltbarkeit der Konstruktion zwingend erforderlich ist: Über lange Zeiträume liegen ansonsten (ohne Schutzmittel) ausreichend hohe Feuchten für ein (langsames) Wachstum vor.

Die gemessenen Holzfeuchten geben kein ganz einheitliches Bild, die Werte verschiedener Messtellen unterscheiden sich teilweise deutlich. Eine gesicherte Aussage über die Tauglichkeit der gewählten Detailgestaltung oder der Wechselwirkung des Innendämmsystems mit durchdringenden Holzbauteilen ist daher, allein auf der Basis der gewonnenen Messwerte, bisher noch nicht möglich. Aus der unkritischen Feuchteentwicklung an der Mehrzahl der Messtellen (4 von 6) ergibt sich eine tendenziell positive Einschätzung. Für besser abgesicherte Aussagen sollten weitere Fälle untersucht werden, ein möglichst langer Messzeitraum wäre dabei besonders wünschenswert.

Die Wärmestrommessungen in annähernd ungestörten Wandflächen zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes in situ während der Winterperiode offenbar deutlich höher ist, als der Nennwert des eingesetzten Produktes. Es ist wahrscheinlich, dass dies mit den hohen gemessenen Feuchtegehalten im kaltseitigen Bereich der Dämmschicht zusammenhängt.

## 2 Vorstellung des Gebäudes, Sanierungsmaßnahmen

Das Untersuchungsobjekt befindet sich in Wartin, nahe Casekow im äußersten Nordosten des Bundeslandes Brandenburg (53° 15' N | 14° 09' E). Es handelt sich um das 1911 errichtete Speichergebäude des Gutes Wartin und befindet sich in unmittelbarer Nachbarschaft des schlossartigen Herrenhauses, in dem heute die Europäische Akademie ansässig ist. Dort werden mit internationalen Studenten Seminare durchgeführt (näheres unter [www.schloss-wartin.de](http://www.schloss-wartin.de)). Zu deren Unterbringung wurde das seit einiger Zeit leerstehende, denkmalgeschützte Speichergebäude 2008/09 als Herberge ausgebaut.



Herrenhaus und Speichergebäude vor Umbau

Abbildung 1



Speichergebäude nach Umbau; Lageplan, Speicher hervorgehoben

Abbildung 2



Der Speicher liegt in westlicher Richtung dicht neben dem Herrenhaus (Schloss) und grenzt den östlich gelegenen Park gegen den (früheren) landwirtschaftlichen Be-

triebshof ab. Durch die offene Hoffläche nach Nordwesten ist diese Seite des Gebäudes wenig geschützt.

Das Speichergebäude ist, bei einer Gebäudetiefe von rund 10 m, ca. 35 m lang und auf allen Seiten mit relativ kleinen Fenstern versehen. Es ist aus einschaligem Ziegelmauerwerk errichtet, die Wandstärke nimmt von unten nach oben schrittweise von ca. 0,75 m auf 0,24 m ab, die Stufen der Querschnittsverminderung dienen als Deckenaufleger. Das Mauerwerk ist in den Obergeschossen als Sichtmauerwerk ausgeführt. Über Kellergeschoss und Erdgeschoss liegen ein Obergeschoss und ein Dachgeschoss, ein flach geneigtes Satteldach schließt das Gebäude nach oben ab. Das Gebäude besitzt Holzdecken aus kräftigen Kiefernholzbalken, die offenbar aus der Errichtungszeit stammen und in gutem Zustand waren, die Dachkonstruktion war stellenweise schadhaft, die Dachabdichtung undicht.

Seiner landwirtschaftlichen Nutzung entsprechend besaß das Speichergebäude keinen Wärmeschutz, die Bausubstanz war durch langjährige Vernachlässigung erneuerungsbedürftig. Der vollflächig vorhandene Keller hatte sich teilweise mit Wasser gefüllt.

## **Sanierungsmaßnahmen**

Auf die Nutzung des Kellers wurde im Zug der Umnutzung verzichtet, die Kappendecke wurde daher abgebrochen und der Raum verfüllt. Nach Austausch schadhafter Hölzer in der Dachkonstruktion wurde eine neue Dachabdichtung aufgebracht und neue Holzfenster mit zweifach-Wärmeschutzverglasung eingebaut, deren Farbgebung und Sprossenteilung den Anforderungen des Denkmalschutzes angepasst wurden. Zur Herstellung erforderlicher Fluchtwege wurden auf der Nordostseite wenige neue Öffnungen geschaffen. Der Fenstereinbau orientierte sich an der ursprünglichen Einbaulage direkt am gemauerten Anschlag. Die Dachkonstruktion erhielt eine Wärmedämmung zwischen den Sparren, die Wandflächen der Obergeschosse wurden mit einer aufgesprühten Innendämmung auf Zellulosebasis (Fabrikat Isocell) von regulär 80 mm Stärke wärme gedämmt.

Das Erdgeschoss wird von einer Gemeinschaftsküche und einem Aufenthaltsraum/Bibliothek eingenommen. Aufgrund von Belastungen durch aufsteigende Feuchte wurde hier auf Innendämmung verzichtet und nur die Fenster erneuert. In den beiden Obergeschossen wurden Schlafräume eingebaut, manche davon mit eigenen Sanitäranlagen. In diesen Räumen kam eine raumweise Be- und Entlüftung durch wandintegrierte Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz (Geräte mit rekuperativer WRG). Die beiden für die Messung verfügbaren Räume besitzen keine eigenen Sanitäranlagen und werden nur manuell über Fenster belüftet.

Das Passivhaus Institut war an der Konzeption, Planung und Umsetzung des Bauvorhabens nicht intensiv beteiligt, es wurden vereinzelte Beratungsgespräche ge-



führt. Aus diesem Grund liegen zu vielen Einzelheiten keine Detailinformationen vor. So sind insbesondere keine Angaben zur Energiebilanz und zur erreichten Luftdichtheit der Gebäudehülle verfügbar.

### 3 Dämmsystem

Bei dem eingesetzten Innendämmsystem auf Basis von Zelluloseflocken handelt es sich um recht junges Verfahren, das es ermöglicht, eine Dämmschicht großflächig lückenlos aufzusprühen.



Montagevorgang, Herstellerfoto

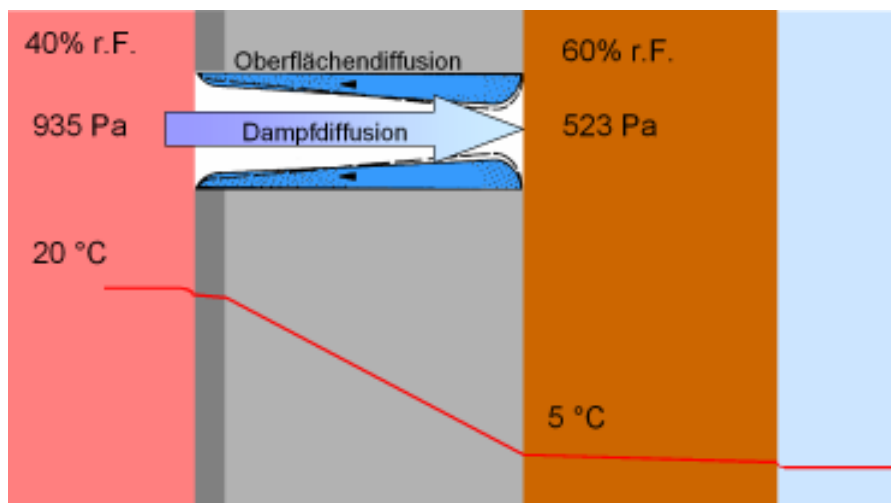
Abbildung 3

Hierzu werden die trockenen Zelluloseflocken mit Hilfe einer besonderen Düse mit einem Leim und wenig Wasser vermengt und die Mischung, einem Putz ähnlich, auf die Wandoberfläche gesprüht. Die Oberfläche wird anschließend glatt abgezogen. Nach angemessener Trockenzeit (bis zu mehreren Wochen, je nach Temperatur und Umgebungsluftfeuchte) erhärtet die Dämmschicht und kann mit einem Spezialputz versehen werden. Anschließend steht eine fertige Wandoberfläche in Neubauqualität zur Verfügung. Genauere Beschreibungen zum Prozeß sind beim Hersteller verfügbar.

Das System weist einige für die Gebäudesanierung interessante Eigenschaften auf. So kann es auf sehr unebenen Untergründen eingesetzt werden, was kostenintensive Vorarbeiten vermeidet. Ebenso können auf der alten Wandoberfläche Leitungen verzogen werden, ohne, dass die weiteren Arbeiten davon beeinträchtigt werden.

Eine zuverlässig lücken- und spaltenfreie Verbindung mit der Wand unterbindet Hinterströmungen im Fall von raumseitigen Leckagen, was allfällige Feuchteschäden zumindest lokal eingrenzen kann.

Aufgrund der besonderen hygri-schen Eigenschaften der Zellulosefasern wird keine raumseitige Dampfsperre benötigt. Auf dem Weg der Dampfdiffusion von der Raumseite her eingedrungene - geringe - Wassermengen können vielmehr durch kapillare Transportmechanismen von der Kaltseite des Dämmbaus -entgegen dem Temperatur- und Dampfdruckgefälle- zur Warmseite gefördert werden. Dort gehen sie wieder in die Gasphase über. Eine übermäßige Aufwech-tung des Wandaufbaus wird so vermieden.



Feuchtetransportmechanismen, Schema

Abbildung 4

Der Verzicht auf eine Dampfsperre umgeht die mit der Herstellung einer wirksamen Dampfsperre unter Baustellenbedingungen verbundenen baupraktischen Anstrengungen, der stattdessen anzubringende zweischichtige und mit Glasgewebe armierte Putz ist ein konventionelles Baumaterial, dessen Verarbeitung grundsätzlich nur geringe Anforderungen stellt. Gleichwohl ist für den Putz eine hohe Verarbeitungsqualität unerlässlich, da nur durch eine lückenlose Luftdichtheit der Putzschicht ein konvektiver Feuchteintrag zuverlässig unterbunden werden kann (vergl. hierzu die Erläuterungen zur Detailgestaltung). Ein konvektiver Wassertransport würde erheblich größere Massenströme in die Konstruktion einbringen als die unkritischen Diffusionsvorgänge und die kapillaren Rücktransportmechanismen schnell überfordern. Schäden wären die Folge. Die sorgfältig luftdichte Herstellung aller Anschlüsse und Durchdringungen ist daher auch bei diesem Dämmsystem ein wesentliches Element.

Dennoch könnte sich ein kapillaraktives Innendämmsystem weniger kritisch hinsichtlich nicht optimaler Randbedingungen verhalten als ein auf eine wirksame Dampfsperre angewiesenes System mit einem nicht kapillaraktiven Dämmstoff. Neben dem



unmittelbaren, stetigen Wasseraustrag auf dem Weg des kapillaren Rücktransportes stehen für saisonale Trocknungsprozesse beide Wandoberflächen zur Verfügung, während bei abgesperrten Aufbauten prinzipgemäß nur die Außenseite daran teilnehmen kann. Es war aus thermisch-hygrischen Simulationsrechnungen zu erwarten, dass ein kapillaraktives Innendämmsystem eine höhere Toleranz gegenüber kleinen Imperfektionen aufweist.

Der Hersteller (Fa. Isocell, A- Neumarkt a. W.) gibt folgende Materialeigenschaften an

Tabellarische Zusammenstellung Materialeigenschaften

Tabelle 1.

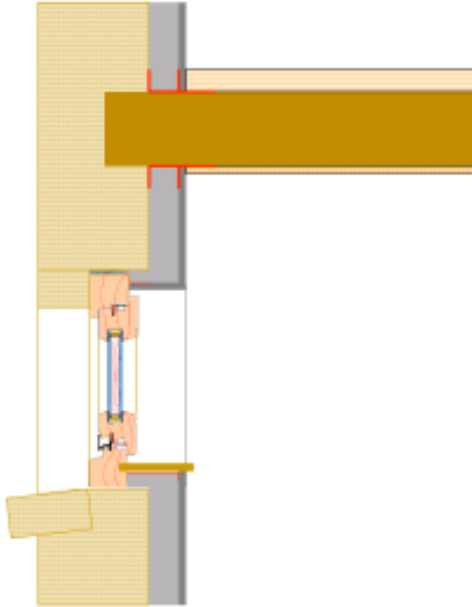
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0.052
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]	2005
Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu$	ca. 2.4
Trocken-Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	ca. 93
Gesamtporosität [%]	ca. 94
Brandverhalten	B2
Brandschutz und Fungizid	Borsäure + Borpenta- hydrat/Ammoniumphosphat
Produktname	<i>Renocell</i>

## 4 Detailgestaltung

Die planmäßige Dämmstärke im Untersuchungsobjekt beträgt 80 mm. Auf Basis der o.a. Wärmeleitfähigkeit ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  des ungestörten Bauteils von ca. 0,48 W/(m<sup>2</sup>K) (Dachgeschoss, 24 cm Mauerwerksstärke) bis ca. 0,44 W/(m<sup>2</sup>K) (Obergeschoss, 42 cm Mauerwerksstärke). Diese Werte sind mit leistungsfähigeren Dämmstoffen leicht noch deutlich zu unterbieten, stellen aber dennoch gegenüber dem Ausgangszustand von ca. 1,9 W/(m<sup>2</sup>K) bis ca. 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) eine deutliche Verbesserung dar. Neben der Einsparung von Heizenergie ist durch höhere Oberflächentemperaturen eine erheblich verbesserte thermische Behaglichkeit [ISO 7730] zu erwarten.

Das lückenlose Aufbringen ist bei der hier betrachteten Innendämmung weit weniger herausfordernd als bei andern Innendämmsystemen. Gleichwohl setzt es voraus, dass alle zu dämmenden Oberflächen für die Bearbeitung zugänglich sind und eine

hinreichender Arbeitsraum für die Sprühapparatur zur Verfügung steht. Die schematische Darstellung zeigt, dass die Zugänglichkeit der Balkenzwischenräume im Deckenbereich gewährleistet sein muss. (Die Frage der luftdichten Einbindung der Balken wird weiter unten separat behandelt)



**Schematischer Schnitt der untersuchten Konstruktion**

**Abbildung 5**

Weiter zeigt die Abbildung bereits die wesentlichen Eigenschaften der Detaillierung der Fensterlaibung, das sind der Anschluss der Dämmschicht und der luftdichte Anschluss der Putzschicht an den Fensterrahmen.

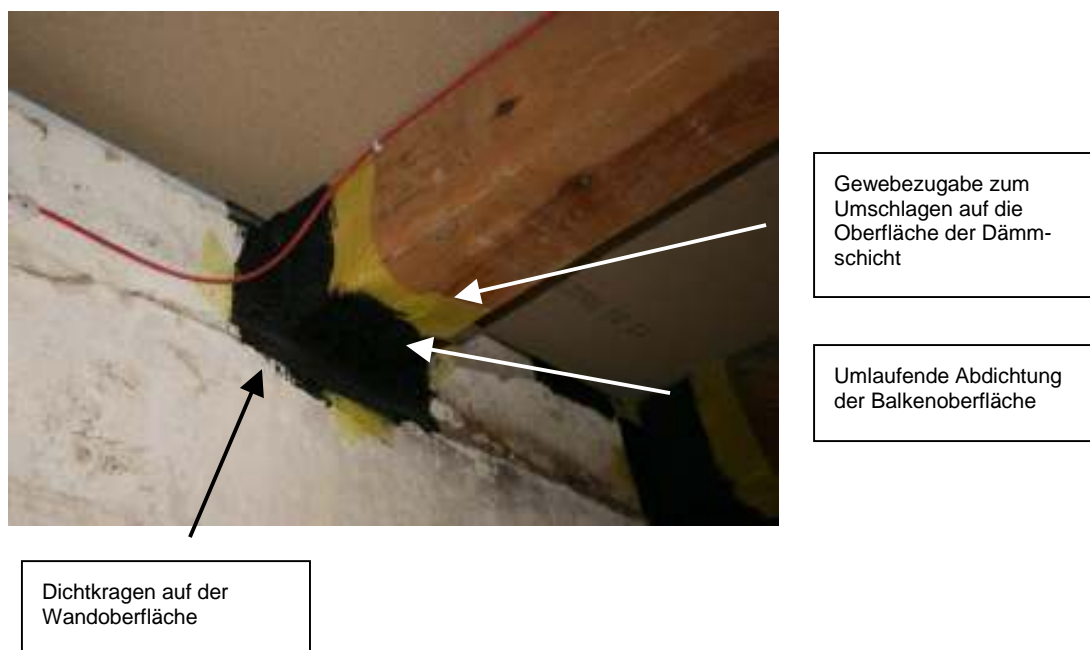
## **Durchdringungen**

Bestehende Deckenbalken durchdringen prinzipiell später angebrachte, innere Dämmschichten. An jeder dieser Durchdringungen ist ein luftdichter Anschluss erforderlich um Schäden zu vermeiden. Das Schadensrisiko am Balken, insbesondere am Balkenkopf, ist gegenüber der Regelfläche noch erhöht, da der Balkenkopf einerseits in die kältesten Bereiche des Mauerwerkes hineinreicht, durch seine Nähe zur Außenoberfläche aber auch von dort eindringendem Wasser besonders stark ausgesetzt ist.

Wie weiter oben beschrieben tritt in dem diffusionsoffenen Innendämmsystem prinzipbedingt regelmäßig eine kleine Menge flüssiges Wasser im Grenzbereich zur Mauerwerkswand auf. Während dies innerhalb der Regelfläche unkritisch ist, erschien diese Erscheinung im Bereich der durchdringenden Holzbalken problema-

tisch: Der selbst kapillar leitende Holzbalken könnte Teile des Wassers aufnehmen und möglicherweise an ohnehin kritische Bereiche (Balkenkopf) weiterleiten. Aus diesem Grund wurde eine weitere Dichtfunktion gefordert, welche die durch die Dämmebene dringende Oberfläche des Holzbalkens vor Feuchte schützt. Dies wurde durch eine Abdichtung der Oberfläche erreicht, die an die Mauerwerksoberfläche in Form eines umlaufenden Kragens anschließt, und vor Beginn aller Dämmarbeiten angebracht wurde. Die Breite der Abdichtung entspricht der späteren Dämmstärke (vergl. Abbildung 6). Eine Herausforderung bestand in der rauhen und teilweise rissigen Oberfläche des Holzes, die das Arbeiten mit herkömmlichen Dichtelementen wie Folie oder Klebebändern erschwert. Eingesetzt wurde stattdessen eine bauübliche Bitumen-Dickbeschichtung (verwendetes Produkt: PCI Pecimor 1K, genaue Kennwerte liegen hierfür nicht vor), die in zwei Lagen mit dazwischen eingelegten Armierungsgittern aus Glasfasern (Putzarmierung) hergestellt wurde. Die folgenden Abbildungen illustrieren den Vorgang.

Das Armierungsgewebe wurde zum Raum hin mit einer Zugabe verarbeitet (gelbes Gewebe entlang des Balkens in der Abbildung), die später auf die fertige Dämmschicht umgeschlagen und dort als zweiter Dichtkragen angearbeitet wurde. Dieser stellt die luftdichte Verbindung zu dem danach aufgetragenen Innenputz her.



Deckenbalken mit erstem Dichtkragen,

Abbildung 6



Deckenbalken mit fertiger Dämmschicht und zweiter Dichte Ebene

Abbildung 7

Sinngemäß wurde mit Bauelementen verfahren, die linear die Dämmschicht durchdringen, beispielsweise direkt vor der Mauerwerksoberfläche angeordnete Stützen oder Balken.



Andichtung der ersten Ebene bei Stützen, Schwellen und Streichbalken

Abbildung 8



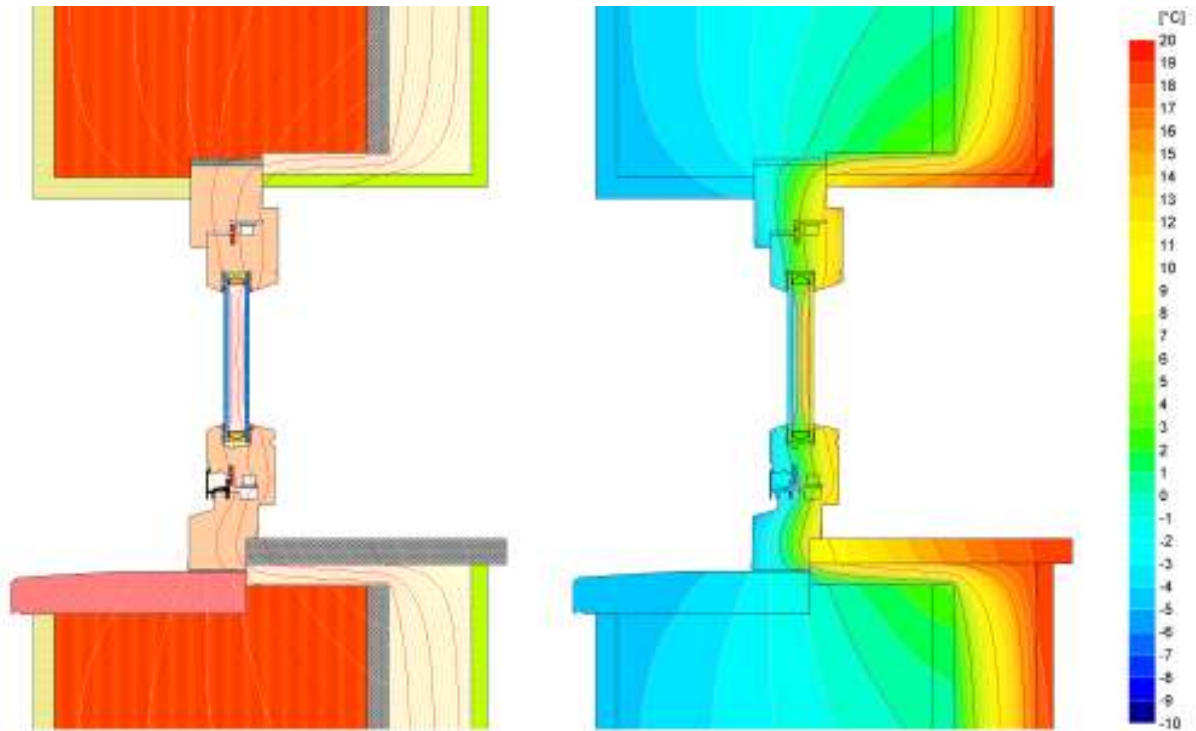
Schwelle und Stützen mit Dämmschicht und zweitem Dichtkragen

Abbildung 9

Es bestand der dringende Wunsch Stützen und Kopfbänder sichtbar zu erhalten. Dies führt zu systematischen Schwachpunkten im Abdichtungskonzept, etwa im Stoßbereich der Hölzer (z.B. Stoßfuge und Verzapfung des Kopfbandes an Stütze/Schwelle, in der Abbildung oben rot markiert) oder im Fall durchgängiger Risse. Trotz solcher Bedenken wurde diese Ausführung gewählt. In der Abbildung sind außerdem Kanthölzer im Bereich der Fensterbrüstung erkennbar. Diese wurden eingesetzt um später eine einfache Montage der Heizkörper zu erlauben. Sie wurden vollständig von der dichtenden Putzschicht überdeckt.

## Fenstereinbau

Bei denkmalgerechter Sanierung mit Innendämmung kann die Einbaulage der Fenster oft nicht ideal im Verlauf der Dämmebene gewählt werden. Durch Beibehalten der Position am gemauerten Anschlag entsteht ein Ebenenversprung beider Elemente, was, ohne weitere Maßnahmen, im Laibungsbereich einerseits erhöhte Wärmebrückenverluste zur Folge hat, zum Anderen aber auch feuchtebedingte Bauschäden durch geringe Oberflächentemperaturen verursachen kann. Gewählt wurde daher ein Einbau mit Laibungsdämmung ähnlich der in der unten dargestellten Wärmestromberechnung verwendeten Geometrie.



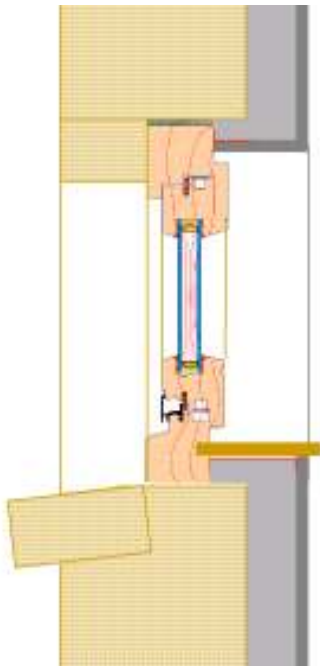
Schema Fenstereinbau mit Laibungsdämmung, Isothermenbild

Abbildung 10

Konkret wurde die Dämmschicht im Laibungsbereich, auf regulär 40 mm Dicke vermindert, bis an das Fenster herangeführt. Durch große Bautoleranzen unterlag diese Dicke am Bau aber größeren Schwankungen. Die Anbindung der Dämmschicht an das Fenster erforderte einen Fenstereinbau vor Montage der Innendämmung.

Für eine spätere luftdichte Anbindung des Fensters an den Luftdichtheit herstellenden Innenputz wurden überputzbare Dichtbänder vorgesehen. Diese wurden vor Montage der Dämmung am Fensterrahmen so angebracht, dass sie, ähnlich den Dichtkragen an durchdringenden Balken, auf die fertige Dämmschicht umgeschlagen werden konnten. Der Innenputz wurde anschließend in konventioneller Art bis an den Blendrahmen des Fensters herangeführt.





Fenstereinbau: Schematischer Schnitt, Foto Laibunsdämmung und Dichtbänder vor dem Umschlagen

Abbildung 11

Die Fensterlaibungen waren Gegenstand besonderen Interesses, daher wurden zwei Fenster mit Sensoren für Temperatur/Feuchte und Oberflächentemperatur versehen. Letztere sind auf dem Foto teilweise erkennbar (rechte Laibung und Sturz).

## 5 Feuchteschutz

Bei allen Innendämmsystemen sind einige Grundbedingungen vorauszusetzen, damit eine schadenfreie Funktion erwartet werden darf. Diese Funktion ist wesentlich durch die Feuchteverhältnisse im Wandaufbau bestimmt, nahezu alle Schäden sind auf eine unzulässige Auffeuchtung zurückzuführen. Von zentraler Bedeutung ist es daher, alle äußeren Feuchtequellen abzustellen. Grundlagen zum Feuchteschutz und zu Feuchtetransportmechanismen in Bauteilen sind in [AkkP32] zusammengestellt.

### Aufsteigende Feuchte

Durch aufsteigende Feuchte können dauerhaft große Wassermengen eingetragen werden, die jede Innendämmkonstruktion schadhaft werden lassen. Ein wirksamer Schutz ist daher zwingende Voraussetzung. Das untersuchte Gebäude wurde ohne

Horizontalsperre errichtet und ein nachträglicher Einbau wegen des großen Aufwandes nicht realisiert. Stattdessen wurde im Erdgeschoss vollständig auf zusätzlichen Wärmeschutz verzichtet. Dies umgeht die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der aufsteigenden Feuchte, gleichzeitig schafft diese Entscheidung jedoch den neuen Detailpunkt am Übergang der gedämmten zur ungedämmten Wand, an dem feuchtebedingte Schäden als Folge geringer Oberflächentemperaturen möglich sind.

## **Feuchte aus dem Innenraum**

Feuchteeintrag aus dem Innenraum, insbesondere durch Konvektion; aber auch durch undichte Installationen, mangelhafte Abdichtungen in Sanitärräumen und dgl. kann zum Versagen einer Innendämmung führen. Eine sorgfältig luftdichte Ausführung des Innenputzes, aller Anschlüsse und Durchdringungen ist erforderlich und wurde angestrebt. In den Duschbädern wurde ein diffusionsoffener, wasserabweisender Anstrich an den gedämmten Außenwänden angebracht, Bereiche mit hoher direkter Feuchtebelastung (Duschen) wurden an den Innenseiten der Räume angeordnet. Zusätzlich leisten dort Be- und Entlüftungsgeräte eine dauernde Feuchteabfuhr. Die genaue Betriebsweise der Geräte konnte im Rahmen der Messung nicht festgestellt werden.

## **Schlagregen**

In Abhängigkeit von der Schlagregenbelastung vor Ort müssen wirksame Konzepte zum Schlagregenschutz gefunden werden. Dabei ist in jedem Fall ein geringer Diffusionswiderstand an der äußeren Wandoberfläche sicherzustellen, damit Trocknungsprozesse über diese Oberfläche nicht beeinträchtigt werden. Lösungen können von wasserabweisenden Anstrichen auf Putzoberflächen über einen äußeren Behang bis hin zu hydrophobierender Behandlung von Ziegeln oder Naturstein reichen. Auf Grund der denkmalschutzanforderungen kam für das Untersuchungsobjekt nur die letztgenannte Option in Frage.

Vor jeder hydrophobierenden Behandlung sollte eine mit einer sorgfältigen Voruntersuchung geprüft werden ob das gegebene Mauerwerk für eine solche Behandlung geeignet ist oder ob Gegenanzeigen, wie etwa eine Salzbelastung vorliegen. Insbesondere bei Salzbelastungen kann es, wenn Wasser durch Diffusion aus dem Mauerwerk ausgetragen wird, gleichzeitig vorhandene Salze in der Nähe der Oberfläche entsprechend aufkonzentriert werden und kristallin ausfallen, zu einer Aufspaltung der Mauersteine und damit zu erheblichen Schäden kommen.

Auch sind die vorhandene Oberfläche und Porigkeit der Steine, ihr genaues Material etc. ein Kriterium zur Auswahl eines geeigneten Hydrophobierungsmittels und zur Bestimmung der erforderlichen Behandlungsweise (etwa, wie viele Aufträge erforderlich sind um eine wirksame Hydrophobierung zu erreichen). Nach sorgfältiger Ausführung entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse ist eine experimentelle Überprüfung des Ergebnisses sinnvoll.

Am Untersuchungsobjekt ist keine vertiefende Voruntersuchung durchgeführt worden. Sichtbare Hinweise auf erhöhte Salzbelastungen lagen nicht vor. Die Hydrophobierung wurde von der beauftragten Rohbaufirma übernommen, es kam eine Siloxanlösung in organischem Lösungsmittel zum Einsatz (Produkt *Funcosil SNL*, Fa. Remmers Baustofftechnik). Nach Aussage des Poliers wurde das Mittel auf das gereinigte und im Fugenbereich teilweise ausgebesserte Mauerwerk zweimal aufgetragen. Eine Überprüfung des erzielten Ergebnisses erfolgte nicht. Dies stellt zwar eine bautypische Situation dar, kann aber nicht empfohlen werden. Andere Untersuchungen (z.B. [Peper 2007], [EnSan 2008]) zeigen, dass die erzielten Eigenschaften auf jeden Fall überprüft werden sollten, da sie zum Teil erheblich von den Tabellenwerten bzw. erwünschten Qualitäten abweichen können.

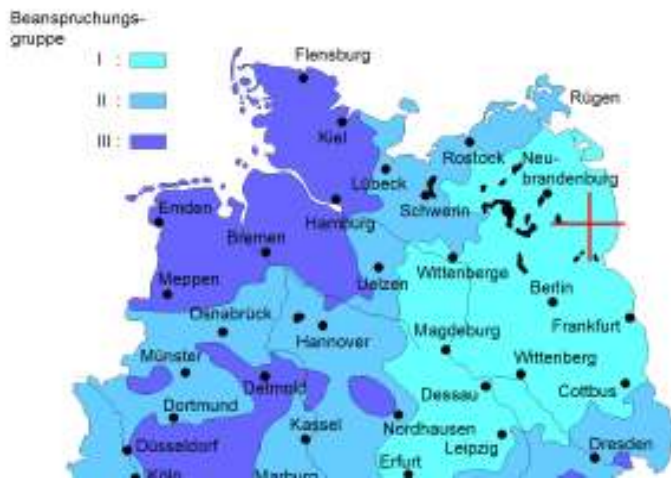


**Äußere Wandoberfläche, orientierende Stichprobenuntersuchung Hydrophobierung mit Prüfröhrchen nach Karsten**

**Abbildung 12**

Es wurde deshalb am 13.11.2008 zur Orientierung wenigstens eine stichprobenhafte Grobuntersuchung mit Prüfröhrchen nach Prof. Karsten durchgeführt. Sie betraf die Westfassade im Bereich der Messtelle im Obergeschoss, links des nördlichsten Fensters. Aufgrund schlechter Zugänglichkeit (nur Leiter verfügbar) und begrenzter Untersuchungszeit konnten nur wenige Stellen untersucht werden. Die unsystematische Stichprobe zeigte eine wirksame, wenngleich nicht perfekte Hydrophobierung.

Durch die Lage in einem Gebiet der Schlagregenzone 1 nach [DIN 4108-3] erschien dies akzeptabel (Zone geringster Beanspruchung).



Auszug aus der Schlagregenkarte der DIN 4108-3, Lage des Objektes Abbildung 13

Die tatsächliche Schlagregenbelastung der untersuchten Nordwestwand wurde messtechnisch erfasst.

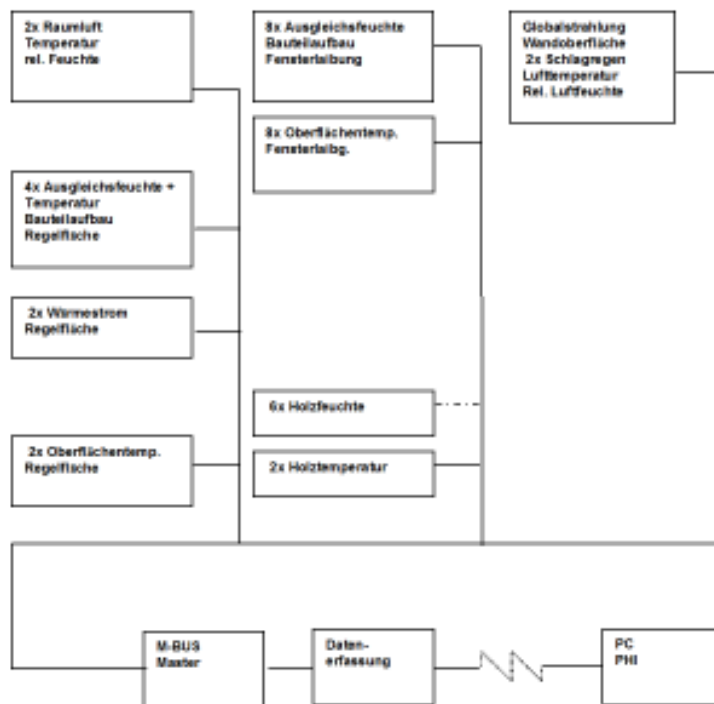
## 6 Begleitmessung

### Messkonzept

#### Aufbau der Messtechnik

Bei der Konzeption der Messtechnik wurde eine sensornahe Umsetzung der Signale auf ein M-Bussystem (gem. DIN EN 1434-3) vorgesehen. Zum Einbautermin waren im Gebäude jedoch grundlegend von der Planung abweichende Grundrisse realisiert worden, so dass die einzige Möglichkeit darin bestand, die Sensorleitungen auf deutlich längerem Weg bis an die Datenerfassungszentrale zu verziehen. Eine Umsetzung auf das Bussystem erfolgte daher erst im Schaltschrank und diente so im Wesentlichen der Datenerfassung mit der vorgesehenen Technik.

Den schematischen Aufbau des Messnetzes zeigt die folgende Abbildung.



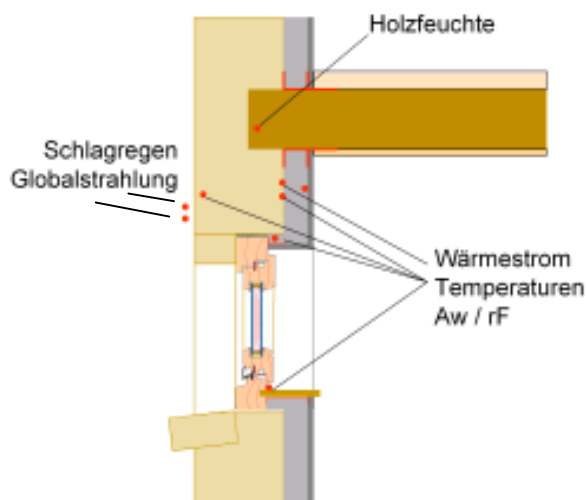
Schematische Übersicht der Sensoren und Datenerfassung

Abbildung 14

Die Messstellen wurden zeitlich hochaufgelöst in 10-minütigen Intervallen mit 2400 Baud abgefragt und die Daten auf dem zentralen PC zur Datenerfassung abgespeichert. Dieser ist mit einer Internetanbindung zur Datenfernübertragung und regelmäßigen Kontrolle der Messdaten ausgestattet. Die Zentrale befindet sich in einem Zwischentrakt zwischen Herrenhaus und Speichergebäude.

## Messtellen

Die Auswahl der Messtellen verfolgte drei Zielsetzungen. Zum einen wurde an je einer möglichst ungestörten Wandfläche in Obergeschoss und Dachgeschoss das Verhalten des Wandaufbaus beobachtet. Dies geschah durch einen kombinierten Temperatur/Feuchte Fühler im Mauerwerk der Aussenwand, ca. 3 cm von der äußeren Wandoberfläche entfernt, der in einem sehr kleinen, abgeschlossenen Hohlraum die Ausgleichsfeuchte (Wasseraktivität) bestimmt. Ein weiterer, baugleicher Fühler zeichnete die Zustände in der Grenzschrift von Mauerwerk und Innendämmung auf. In derselben Ebene wurde auch eine Messplatte für die direkte Aufzeichnung des Wärmestromes angebracht. Die Überwachung der Regelflächen wird raumseitig durch einen Temperatursensor in der Putzschicht zur Erfassung der Oberflächen-temperatur vervollständigt.



Position der Messtellen, schematisch

Abbildung 15

Sowohl im Obergeschoss als auch im Dachgeschoss wurden Raumluftkonditionen (Temperatur und relative Feuchte) gemessen, die äußeren Randbedingungen werden durch ein Pyranometer in der Wandebene (Globalstrahlung Wand) und durch zwei Infrarot-Regenmesser an den Messtellen in OG und DG erfasst. An der Nordostseite des unbeheizten Verbindungsbaus zum Herrenhaus befindet sich eine strahlungsgeschützte Messtelle für Aussenlufttemperatur und –feuchte.

Daneben wurde der Dämmbau von verminderter Dicke in den Fensterlaibungen untersucht. An je einem Fenster in OG und DG wurden Sensoren für Temperatur/Feuchte in der Grenzschrift zum Mauerwerk installiert. Dabei wurden alle vier



Fensterlaibungen betrachtet. An jeder Messtelle wurde auch ein Temperatursensor im Innenputz eingearbeitet um eine Aussage zu den Oberflächentemperaturen treffen zu können.

Außerdem wurden an insgesamt sechs Stellen Holzfeuchten gemessen, um das Verhalten der Konstruktionshölzer einschätzen zu können.

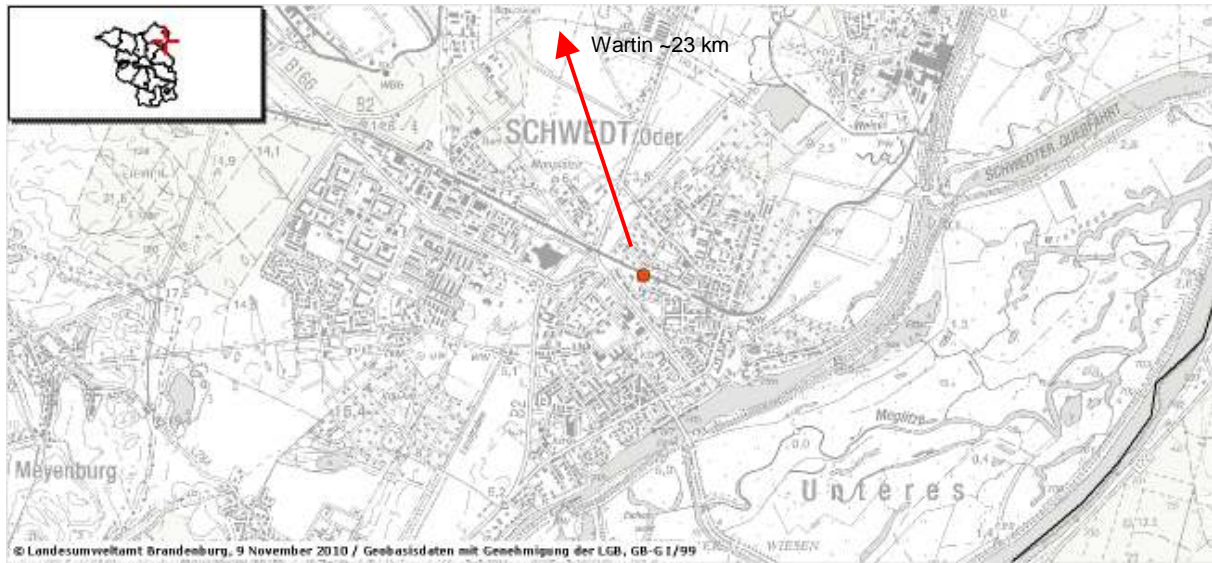
### **Auswertezeitraum**

Die Messdatenerfassung begann mit Einschränkungen am 12.11.2008. Ein vollständiger Betrieb konnte erst in den folgenden Monaten erreicht werden. Zur Auswertung wird der Zeitraum vom 01.07.2009 bis 30.06.2010 herangezogen.

### **Wetterdaten**

Da sich im Zuge der Begleitmessung die Errichtung einer vollwertigen Wetterstation direkt am Objekt als nicht möglich erwies (u.a. aus denkmalsrechtlichen Gründen), wurden Daten des brandenburgischen Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Referat Luftqualität herangezogen. Diese wurden hierfür freundlicherweise zur Verfügung gestellt und stammen aus der Station Schwedt/Oder (53°03,5' N | 014°17,6' E). Es lagen Halbstunden- Werte der Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung vor.

Die Entfernung der Wetterstation Schwedt vom Untersuchungsobjekt beträgt ca. 23 km, die Landschaft weist nur geringe Höhenunterschiede auf.



**Lage der Wetterstation Schwedt/O. (DEBB029)**

**Abbildung 16**

Die verwendete Sensorik ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tabellarische Zusammenstellung der Messtechnik**

**Tabelle 2.**

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
Luftfeuchte, Temperatur	Wandaufbau / Raumluft / Aussen- luft	% rF / °C	Miniatur Feuchte/ Temperatur Mess- umformer	E+E Elek- tronik	+/- 3% r.F. (0...95%rF) +/- 0,3 C° (bei 20C°)
Wärmestrom	Wandaufbau	W/m <sup>2</sup>	Wärmestrom- messplatte Typ 7	Phymeas	+/- 5%
Oberflächen- temperaturen	Wand raumseitig	°C	Pt 100	Fa. TC Direkt	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Niederschlagsmenge	Außenwand	Liter/m <sup>2</sup> Wand- fläche	Niederschlags- sensor	Fa. Thies	Keine Angaben
Globalstrahlung	Außenwand	W/m <sup>2</sup>	CM 11	Kipp Zonen	+/- 2%
Signalwandler	-	-	AnDi (Analog/ Digi- talswandler)	Fa. Relay	+/- 0,4 % des Messberei- ches
Transmitter	-	-	IPAQ L (Pt100 4 Leiter Umsetzer)	Fa. INOR	+/- 0,1 % der Mess- Spanne

## Messdatenauswertung

### Wetterdaten im Auswertezeitraum

#### Strahlung

Zur Einschätzung der gemessenen Werte wurden Klimadaten der Sammlung [Meteonorm] herangezogen und nach den dort verwendeten Algorithmen für den Standort Wartin ausgewertet. Hiernach handelt es sich bei dem Auswertezeitraum um ein gegenüber dem Mittel einstrahlungsreiches Jahr mit ca. 13% erhöhter Jahressumme. Nach der Globalstrahlungskarte des [DWD] liegt die jährliche Globalstrahlungssumme zwischen 1141 und 1160 kWh/m<sup>2</sup>a, danach lägen die an der Station Schwedt gemessenen Werte nur geringfügig über dem zu erwartenden Mittel.



Pyromometer an der Speicherwand, Dachüberstand

Abbildung 17

Die an der Speicherwand gemessene Globalstrahlungssumme beträgt nach Interpolation einer Datenlücke 485 kWh/m<sup>2</sup>a. Die Interpolation erfolgte auf Grundlage der gemessenen Werte und des im Interpolationszeitraum zu erwartenden Strahlungsanteils der Jahressumme. Nach den Algorithmen von [Meteonorm] wird für eine gleich orientierte Wand eine Globalstrahlungssumme von 577 kWh/m<sup>2</sup>a errechnet. Die Berechnung geht dabei von vollständig unverschatteter Lage aus, wohingegen am realen Speicher durch den Dachüberstand und auch die Dachrinne eine Verschattung besteht. Berücksichtigt man einen vereinfacht nach PHPP bestimmten Verschattungsfaktor von 0,92 für das gegenüber der Messebene des Sensors ca. 0,85 m auskragende und ca. 2,5 m entfernte Dach, so ergibt sich eine Jahressumme von ca. 527 kWh/m<sup>2</sup>. Die Differenz zu dem Wert nach [Meteonorm] ist dann geringer als 10%. In der Zusammenschau der Überlegungen zu den Globalstrahlungssummen

scheinen im Auswertzeitraum keine ungewöhnlichen Bedingungen geherrscht zu haben.

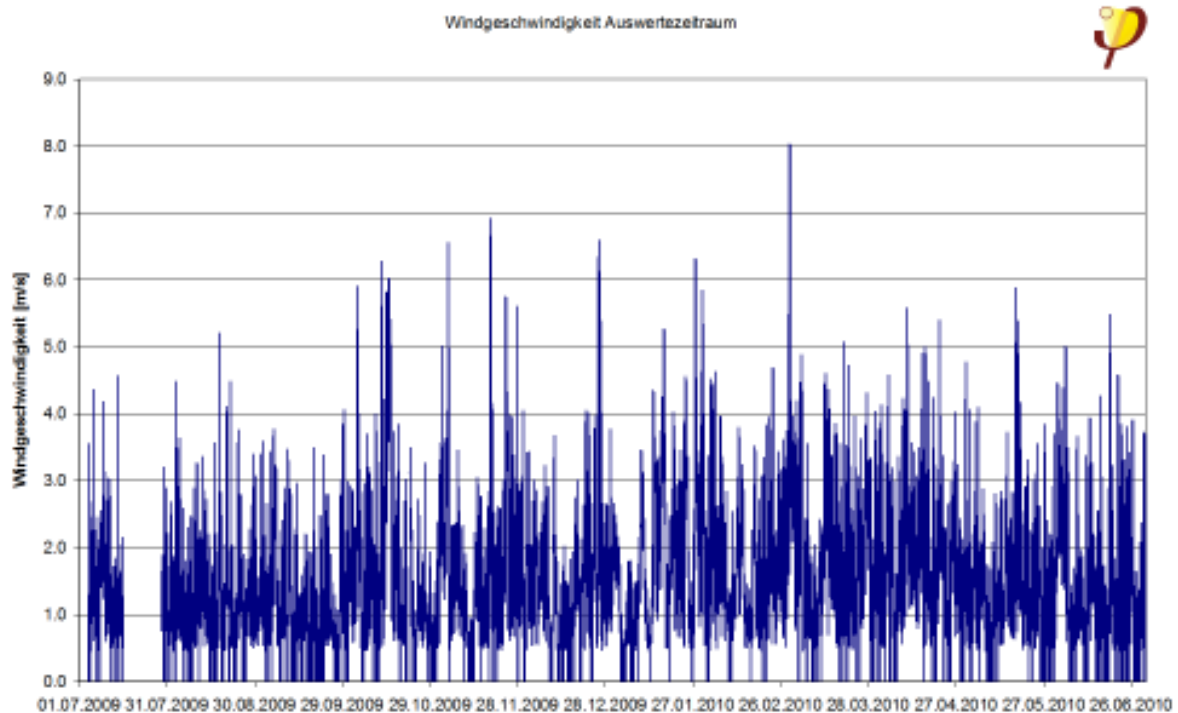
**Gegenüberstellung Strahlungsdaten**

**Tabelle 3.**

	[Meteonorm]	[DWD]	Messwert Station Schwedt	Messwert Speicher
Globalstrahlung horizontal	1040 kWh/m <sup>2</sup> a	1141-1160 kWh/m <sup>2</sup> a	1179 kWh/m <sup>2</sup> a	
Globalstrahlung Speicherwand (296°, vertikal)	577 kWh/m <sup>2</sup> a (unverschattet)			485 kWh/m <sup>2</sup> a

**Wind**

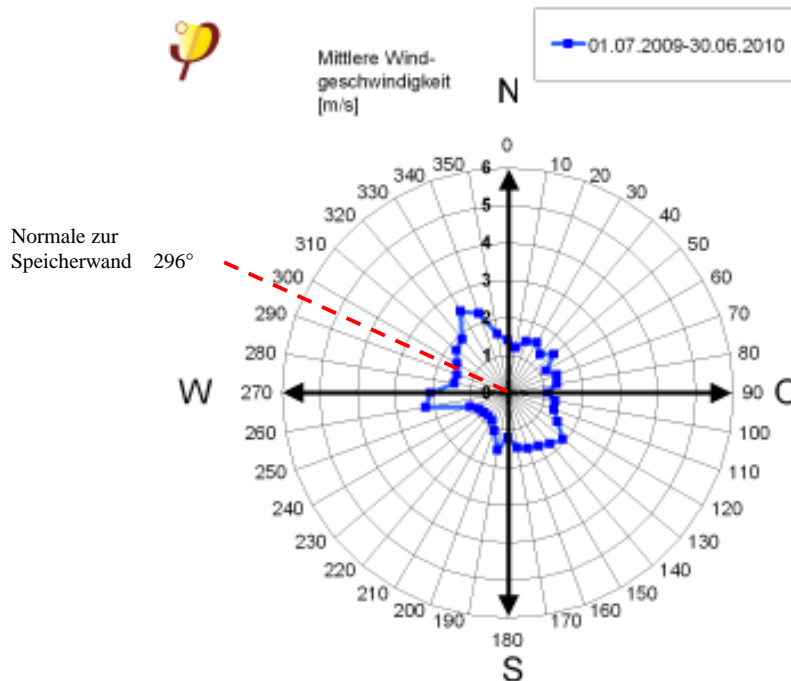
Die Übersicht der im Auswertzeitraum gemessenen Windverhältnisse der Station Schwedt zeigt im Mittel nur geringe Windgeschwindigkeiten, 3 m/s werden nur kurzzeitig überschritten. Das Maximum betrug 8.03 m/s und wurde am 01.03.2010 um 6:00 aus westlicher Richtung (265°) gemessen. Der Mittelwert der Windgeschwindigkeit betrug 1,58 m/s, die Standardabweichung 1,02 m/s (Median 1,37 m/s).



**Windgeschwindigkeit im Auswertzeitraum**

**Abbildung 18**

Um einen Überblick über den Zusammenhang von Windstärke und –richtung zu gewinnen sind Polardiagramme hilfreich. Die folgende Abbildung zeigt ein solches Diagramm für den gesamten Auswertzeitraum. Aufgetragen ist die mittlere Windgeschwindigkeit je Richtung in 10° Schritten.



Mittlere Windgeschwindigkeit und -richtung im Auswertzeitraum

Abbildung 19

Vorherrschend ist Wind aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen, daneben treten südöstliche Winde hervor. Der Anhang dokumentiert monatsweise Auswertungen dieser Art.

## Regen

Die langjährigen Statistiken des Deutschen Wetterdienstes lassen für Wartin eine mittlere, jährliche Niederschlagshöhe um 550 mm erwarten, es handelt sich also um ein vergleichsweise niederschlagsarmes Gebiet. Zusammen mit den als Messwerten vorliegenden Windverhältnissen kann die Zuordnung zu der Beanspruchungsklasse I der DIN 4108-3 gut nachvollzogen werden. Aktuelle Messdaten für den Niederschlag im Auswertzeitraum konnten von der Station Schwedt nicht erhalten werden, da dieser Parameter dort nicht erfasst wird. Es wurden aber an beiden Wand-Messtellen Schlagregenmessungen direkt an der Fassade vorgenommen. Die Sensoren sind in der folgenden Abbildung erkennbar.



**Sensoren für Schlagregen und Strahlung an der Fassade**

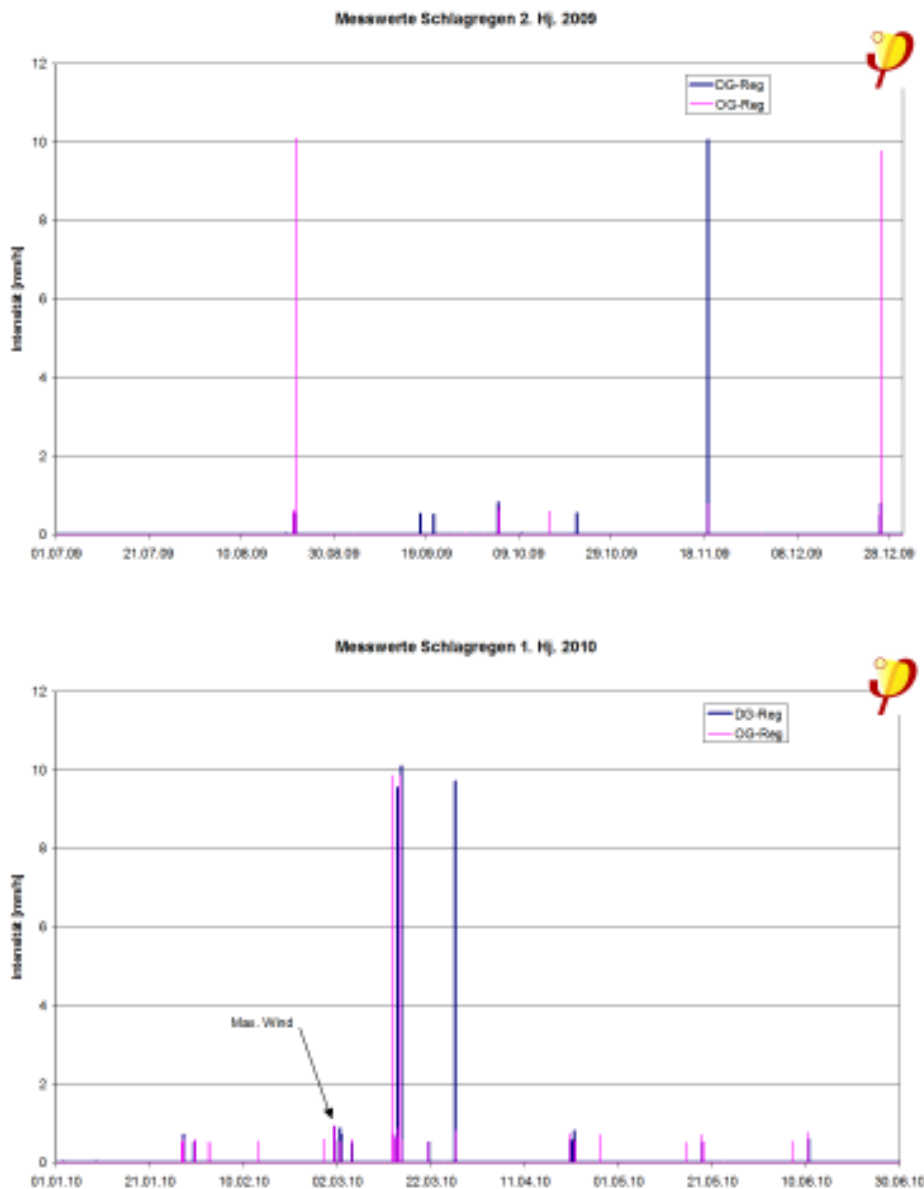
**Abbildung 20**

Die Regensensoren sind jeweils knapp unterhalb der Messtelle angeordnet, so dass der von ihnen ausgehende Störeinfluss auf die Messtelle minimal bleibt. Ebenso sind beide Messtellen seitlich gegeneinander versetzt, um den Einfluss des vom oberen Sensor abtropfenden Wassers gering zu halten. Das Signal wurde über die zentrale Messdatenerfassung im Intervall von 10 Minuten aufgezeichnet, es liegen also Messwerte in hoher zeitlicher Auflösung vor. Gleichwohl wird nicht jede Bö erfasst, was als Unsicherheit in der folgenden Betrachtung zu berücksichtigen ist.

### **Schlagregenbelastung im Auswertzeitraum**

Die gesamte im Auswertzeitraum registrierte Schlagregenmenge war mit 19,0 l/m<sup>2</sup> an der oberen Messtelle (Dachgeschoss) bzw. 23,3 l/m<sup>2</sup> an der unteren Messtelle (Obergeschoss) gering. Die Zuordnung zu einer gering mit Schlagregen beanspruchten Region bestätigt sich damit auch für den Auswertzeitraum. Dennoch können Einzelereignisse zu kurzzeitig deutlich höherer Beanspruchung führen. Die folgenden Abbildungen zeigen daher eine Übersicht der zeitlich hochaufgelösten Messwerte (10 min).





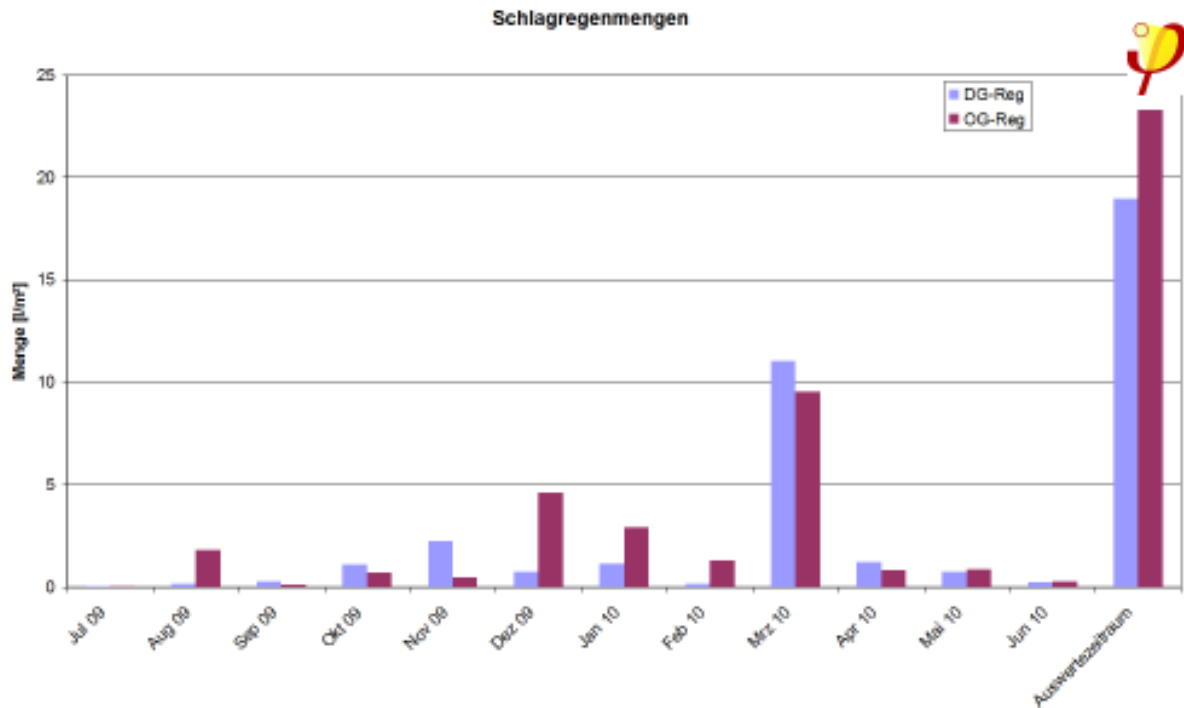
Gemessene Schlagregenbelastungen der Fassade

Abbildung 21

Erkennbar wird, dass nahezu alle Regeneinwirkungen auf die Fassade nur kurzzeitig sind, selten dauern die auf der Fassade gemessenen Intensitäten mehr als ein Messintervall von 10 min an. Typisch werden Intensitäten von um  $1 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$  registriert, seltene Ereignisse erreichen aber wesentlich höhere Intensitäten. Interessanterweise liegen diese Ereignisse erhöhter Schlagregenintensität auf nahezu gleicher Höhe, um  $10 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ .

Der Zeitraum mit den höchsten gemessenen Windstärken (Station Schwedt) geht zwar mit einer erhöhten Frequenz der Schlagregenereignisse einher, es kommt jedoch nicht zu signifikant höheren Intensitäten. Gleichwohl bleibt der März 2010 der am Stärksten mit Schlagregen belastete Zeitraum, es fallen große Teile der Jahres-

belastung in diese Zeit (Messtelle DG 58 %, Messtelle OG 41 %). Eine monatweise Aufstellung der Schlagregelmengen, abgeleitet aus den gemessenen 10 min-Werten, gibt die folgende Grafik:



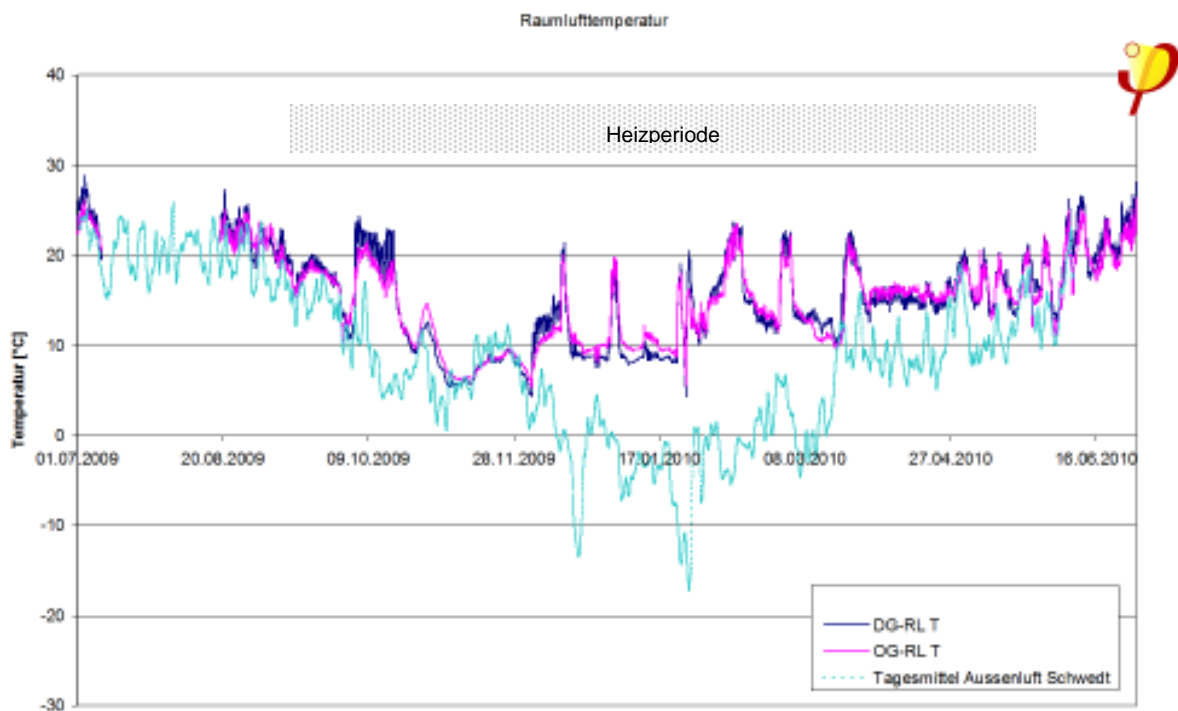
**Gemessene Schlagregelmengen auf der Fassade**

**Abbildung 22**

Die insgesamt etwas höhere Belastung an der tiefer gelegenen Messtelle (OG) ist zudem zeitlich weniger stark konzentriert; zu vermuten ist, dass dies durch die hier verringerte Schutzwirkung des (weiter entfernten) Dachüberstandes bewirkt wird.

### **Innenraumlufthtemperatur, -feuchte, Gebäudenutzung**

Wie eingangs erwähnt dient das sanierte Gebäude der Beherbergung von Seminar-gästen. Es handelt sich also um eine intermittierende Nutzung, wobei der für die Sa-nierung erbrachte Aufwand eine entsprechend intensive Nutzung auch in der Heizpe-riode erwarten lässt. Während der Heizperiode stellt die Raumlufthtemperatur einen guten Indikator für den Nutzungszustand der betrachteten Räume in Dachgeschoss und Obergeschoss dar, sie ist in dem folgenden Diagramm erkennbar.

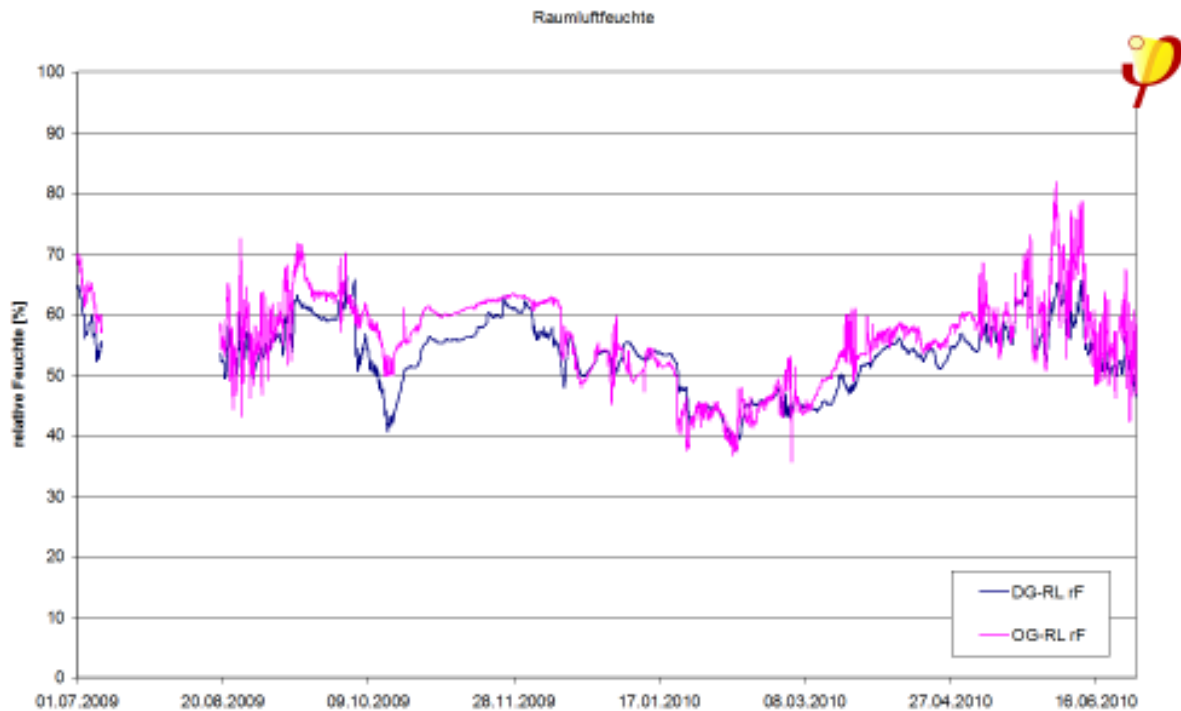


Raumlufttemperaturen im Auswertezeitraum

Abbildung 23

Während für die Sommerzeit anhand der Temperaturen keine Aussage über den Nutzungszustand möglich ist, kann er in der Heizperiode gut dem Temperaturverlauf zugeordnet werden. Wie sich zeigt, war die Nutzung im Auswertezeitraum von recht langen Phasen mit lediglich einem Frostschutzbetrieb der Heizung unterbrochen. Beheizte Zeiträume selbst sind kurz und dauern zum Teil nur einen Tag, bzw. wenige Stunden eines Tages an. Die vorgefundenen Nutzungszeiten waren deutlich kürzer als erwartet. Grundsätzlich kommt die Betriebsweise aber der Charakteristik der Innendämmung insofern entgegen, als Anheizvorgänge rasch durchgeführt werden können und schnell zu einem behaglichen operativen Temperaturniveau führen.

Neben der Raumlufttemperatur wurden die Werte der relative Luftfeuchte erfasst, die eine bedeutende Randbedingung für das Verhalten der Innendämmung darstellen. Diese schwanken (bei gleichem Wassergehalt der Luft) mit der Temperaturveränderung der Raumlufte in gegenläufiger Weise. Einen Überblick gibt die folgende Abbildung.



Relative Raumlufffeuchte im Auswertezeitraum

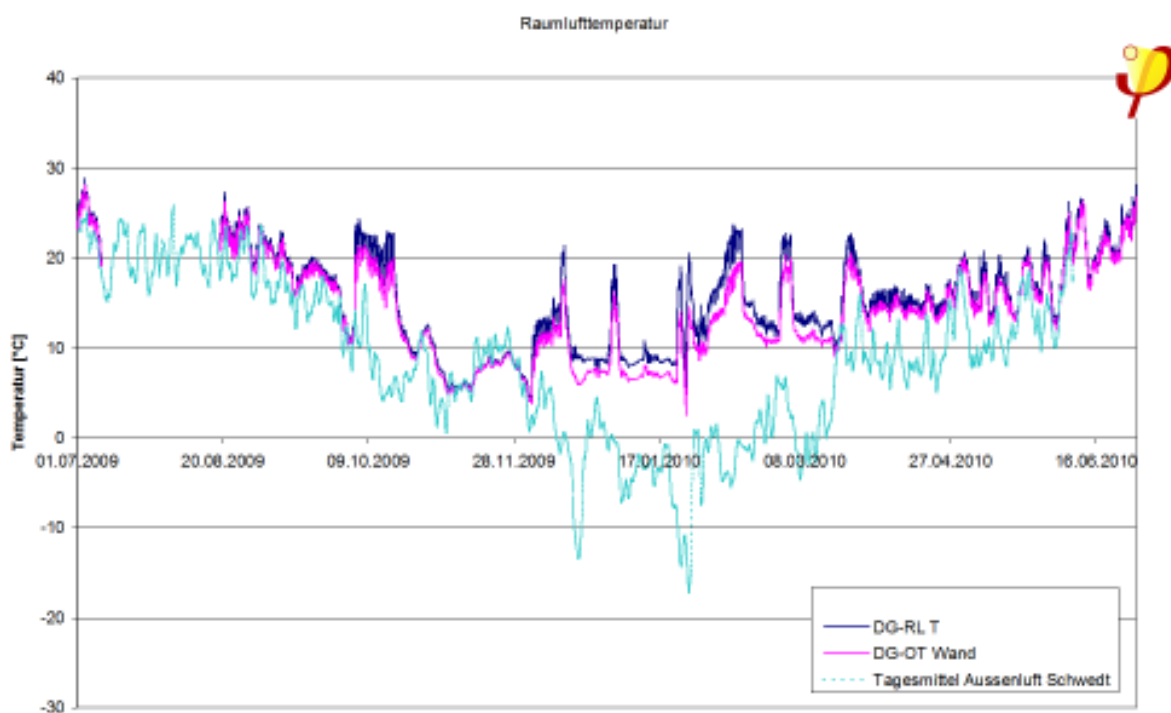
Abbildung 24

Es zeigt sich, dass während des gesamten Zeitraumes keine geringen Raumlufffeuchten (< 30 %) gemessen wurden. Auch bei Anheizvorgängen fällt die Feuchte nur wenig ab, was neben der i.d.R. kurzen Nutzungsdauer auch auf die ausgeprägte Pufferwirkung der Konstruktion und geringen Luftwechsel durch Fensteröffnung hinweist. Sowohl der Innenputz als auch besonders die Zellulosedämmung binden durch Sorption erhebliche Wassermengen, die bei kurzzeitigen Schwankungen der Raumlufffeuchte ausgleichend wirken. Die Feuchteabfuhr durch Fensterlüftung ist nicht kontinuierlich gegeben und zudem stark von den wechselnden Nutzern abhängig. Es darf vermutet werden, dass die Nutzer sich tagsüber weitgehend in den Seminarveranstaltungen aufhalten und die Räume daher nur zum Schlafen und für kurze Zeiten des Selbststudiums belegt sind. Beides setzt dem praktisch erzielbaren Luftwechsel enge Grenzen.

### Oberflächentemperaturen

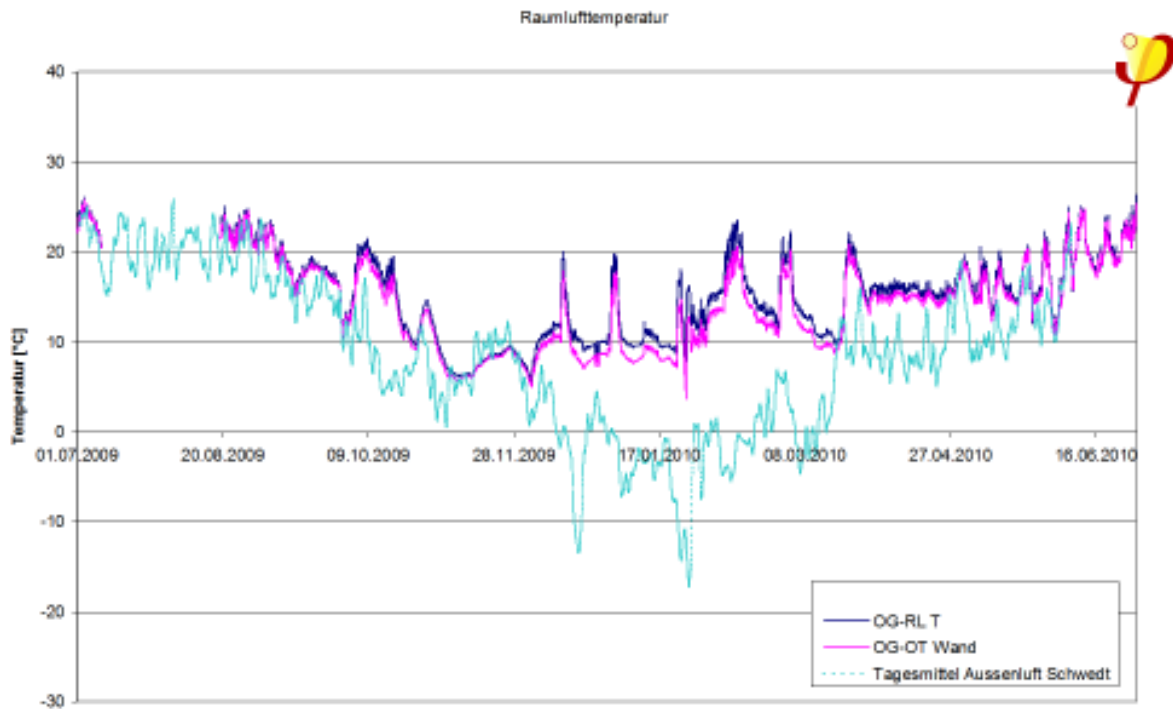
Die Oberflächentemperatur von Außenbauteilen bestimmt die für den Nutzer im Raum wahrnehmbare Behaglichkeit wesentlich mit. Wärmedämmmaßnahmen im Zuge von Sanierungen haben daher neben der Begrenzung von Wärmeverlusten die Anhebung der inneren Oberflächentemperatur zum Ziel. Um die konkret vorliegende Wirkung messtechnisch erfassen zu können, wurden Temperatursensoren in die

raumseitige, ca. 15 mm starke Putzschicht eingebracht. Da diese Schicht neben ihrer geringen Stärke eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, gibt der gemessene Wert die Oberflächentemperatur des Bauteils mit hinreichender Genauigkeit wieder. Messwert und tatsächliche Oberflächentemperatur unterscheiden sich dabei im Wesentlichen um den Einfluss des Wärmedurchlasswiderstandes der Putzschicht. Dieser ist mit ca.  $0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$  gering. Im Weiteren wird auf den Versuch einer Korrektur der Messwerte verzichtet, stattdessen werden die Werte wie aufgezeichnet dargestellt. Es bleibt aber zu berücksichtigen, dass die Werte der Oberflächentemperatur in der Tendenz etwas höher sind als die Messwerte, für eine Komfortbetrachtung erfolgt also eine konservative Bewertung.



Wandoberflächentemperatur DG im Auswertzeitraum

Abbildung 25

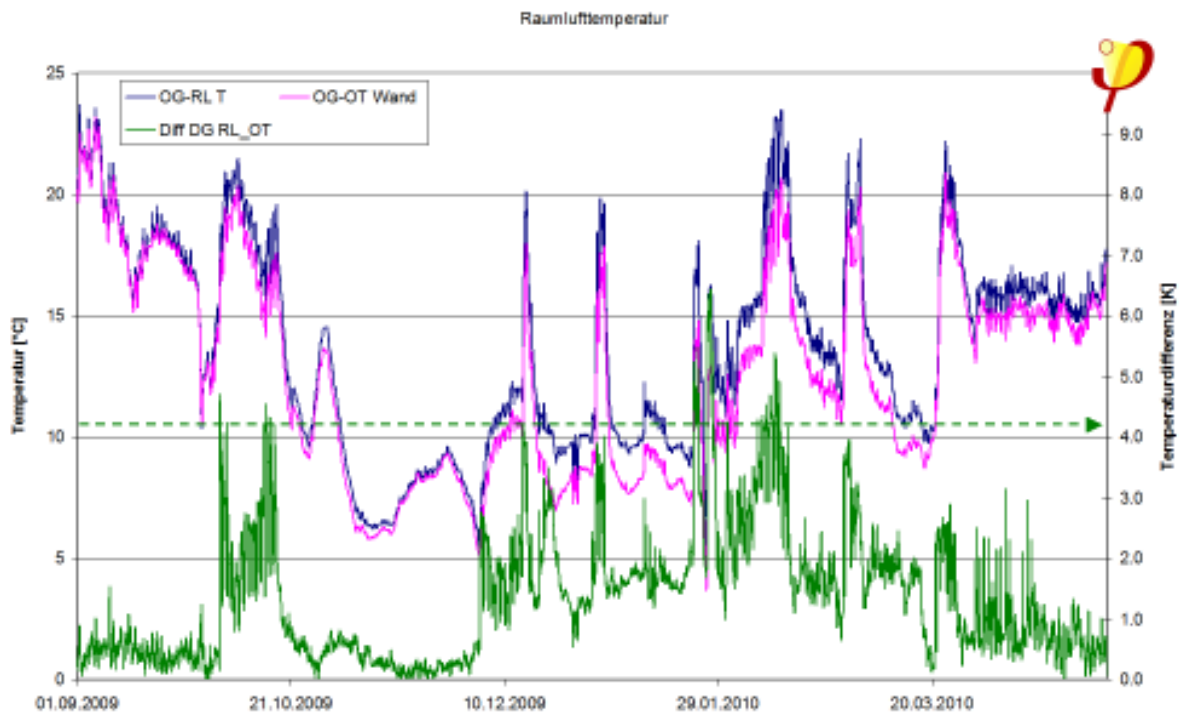


Wandoberflächentemperatur OG im Auswertzeitraum

Abbildung 26

Wie in einem innengedämmten Raum zu erwarten ist die Oberflächentemperatur in beiden Räumen erkennbar stark an die Raumlufthtemperatur gekoppelt. Bereits kurze Zeit nach Beginn eines Anheizvorganges werden recht hohe Oberflächentemperaturen mit geringem Unterschied zur Raumlufthtemperatur erreicht. Zur näheren Auswertung dieses Umstandes ist eine Auswertung der Differenzen hilfreich. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturdifferenz von Raumlufthtemperatur und Oberflächentemperatur für die Heizperiode im Obergeschoss.





Temperaturdifferenz Raumluft – Wandoberfläche OG, Winter 09/10.  
4,2 K werden nur kurzzeitig überschritten

Abbildung 27

Erkennbar sind Temperaturdifferenzen, die während der Nutzungszeiten überwiegend unterhalb der komfortkritischen Grenze von 4,2 K [Feist 2007] bleiben. Kurzzeitig werden höhere Werte erreicht. Ist der Raum ungenutzt, sind die Differenzen wie zu erwarten besonders gering.

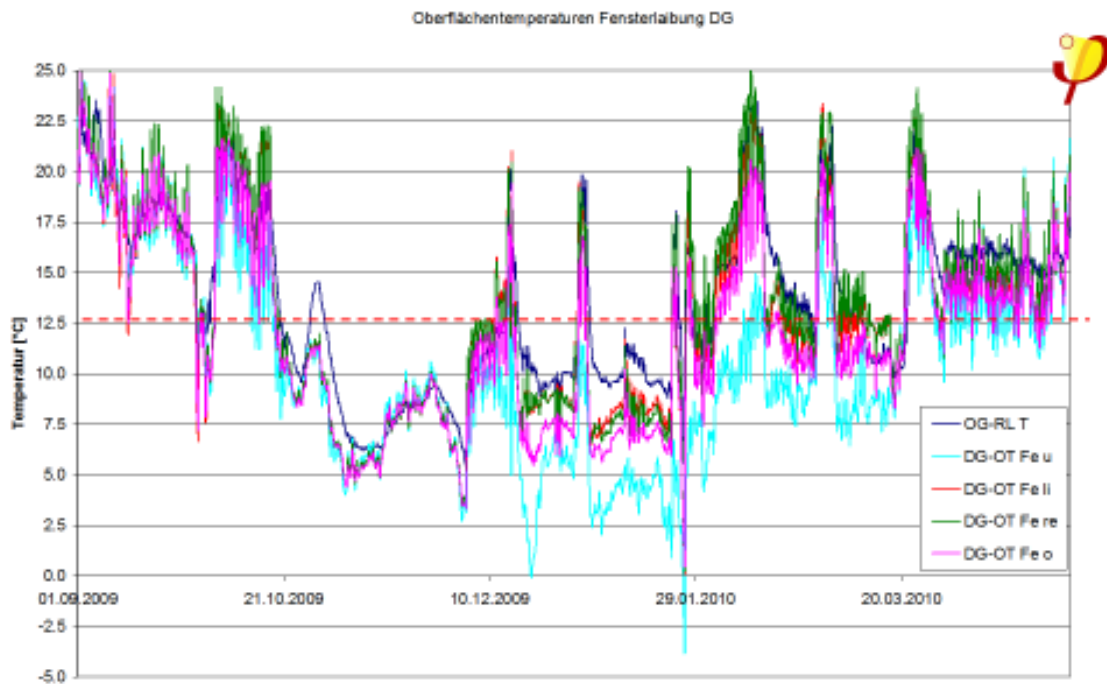
Weitere Oberflächentemperaturen wurden in den Fensterlaibungen gemessen. Die folgende Abbildung zeigt die Anordnung der Sensoren, die, wie in der Wandfläche, auch hier in die Innenputzschicht eingebettet sind. Um eine Beurteilung der Anschlussituation zu erlauben wurde im Anschlussbereich an den Blendrahmen des Holzfensters gemessen.



**Sensor Oberflächentemperatur Fensterlaibung, noch unverputzt (OG)      Abbildung 28**

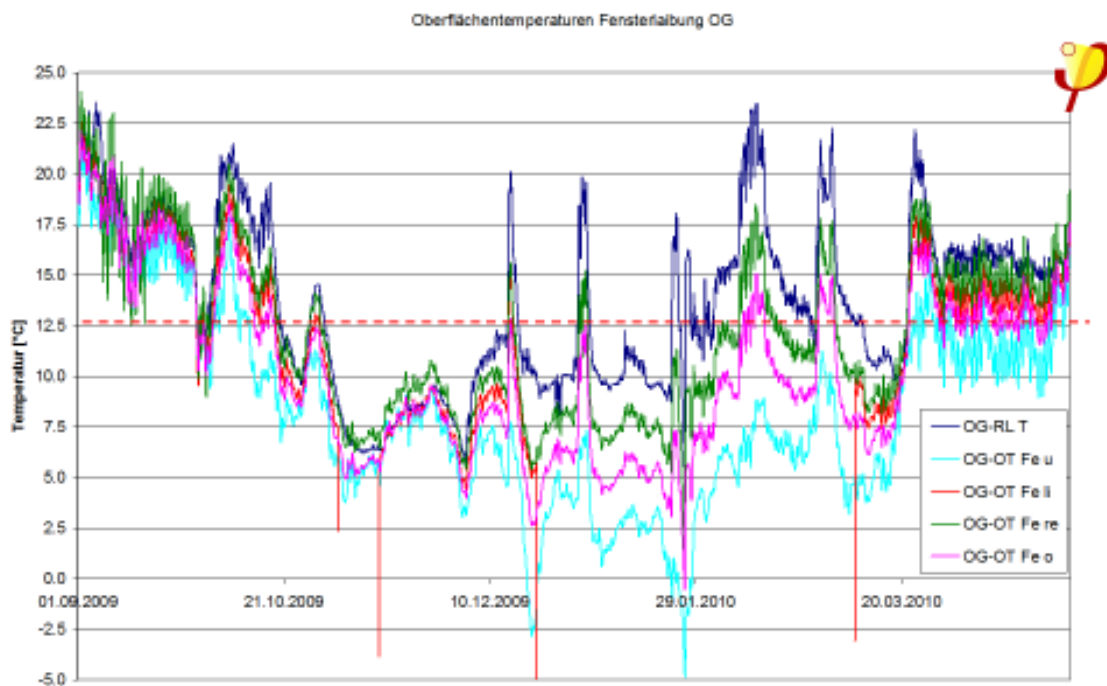
Für die Fenster in OG und DG wurden jeweils alle vier Laibungen instrumentiert, der Sensor ist jeweils etwa in Fenstermitte angeordnet. Die Lage korrespondiert mit der des Temperatur/Feuchtefühlers in der Grenzsicht Dämmung/Mauerwerk (Vorstellung im übernächsten Abschnitt).

Die gemessenen Temperaturen weisen an beiden untersuchten Fenstern einen auffälligen Unterschied der Temperatur der unteren Laibung (Fensterbank) zu den übrigen Temperaturen auf. Im DG können links, oben und rechts während der Nutzungsphasen Temperaturen oberhalb der bei normalen Raumluftkonditionen (20°C, 50% r.F.) kritischen Oberflächentemperatur von 12,6 °C (Wasseraktivität dann 0.8, Schimmelwachstum möglich) festgestellt werden. Im Bereich der Fensterbank wird diese Temperatur häufig unterschritten, Beeinträchtigungen durch hohe Feuchte können auf Dauer hier nicht ausgeschlossen werden.



Oberflächentemperaturen Fensterlaibung DG, kritische Grenze 12,6 °C **Abbildung 29**

Am Fenster im OG tritt der Effekt geringer Oberflächentemperatur in der unteren Laibung noch ausgeprägter auf. Zudem ist aber auch der obere Fensteranschluss gefährdet. Unkritisch verhalten sich nur die seitlichen Laibungen.



Oberflächentemperaturen Fensterlaibung OG, kritische Grenze 12,6 °C **Abbildung 30**

Im Fall der bei beiden Fenstern zu beobachtenden geringen Temperatur im unteren Bereich kann eine gemeinsame konstruktive Ursache vermutet werden. Die folgende Abbildung zeigt einen Bauzustand des Fensters im DG. Erkennbar ist die Lage der Rollschicht zu dem Fensterrahmen, die linienförmig annähernd zusammenstoßen; falls hier vor Anbringen der Dämmschicht nicht nachgearbeitet wurde (was vermutet werden muss), ist eine Laibungsdämmung in diesem Bereich nicht, oder zumindest nur in minimaler Stärke wirksam. Eine thermische Anbindung der Laibungsdämmung an den Fensterrahmen ist dann nicht gegeben, neben geringen Oberflächentemperaturen sind die Wärmeverluste deutlich erhöht.



Kante Rollschicht

Fenstereinbau DG, Bauzustand

Abbildung 31

Das Foto zeigt auch, dass im Fall des DG-Fensters die Rohbauöffnung besonders breit war, die Laibungsdämmung seitlich also besonders stark ausfiel. Zudem wurden als Toleranzausgleich beidseitig Streifen von XPS eingebaut. Die gemessenen Laibungs-Oberflächentemperaturen reflektieren dies und fallen im DG besonders hoch aus. Am Sturz ist der Raum für Laibungsdämmung erkennbar knapp, entsprechend liegt die Oberflächentemperatur hier niedriger als in den seitlichen Laibungen.



Fenstereinbau OG, Bauzustand

Abbildung 32

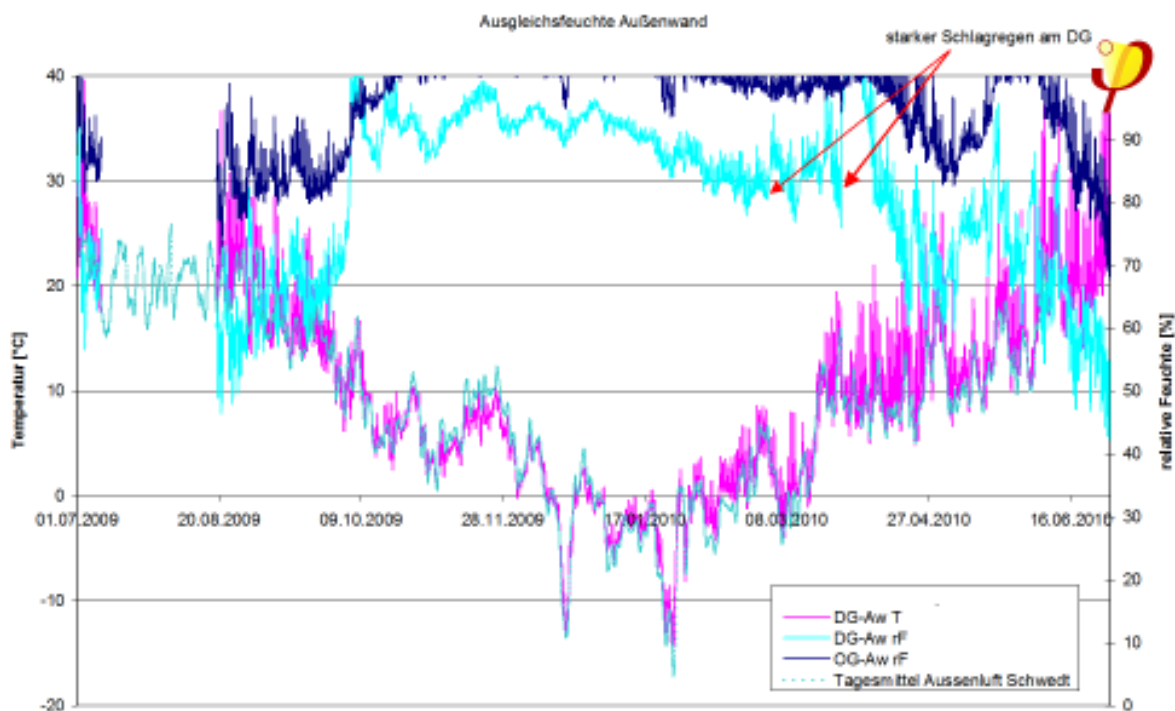
Im Fall des OG-Fensters sind nach den vorliegenden Fotografien seitlich etwa die geplanten Laibungsdämmstärken zu erwarten, entsprechend verhalten sich die Oberflächentemperaturen unkritisch. Die Laibung im Sturzbereich zeigt deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen, die erforderliche Oberflächentemperatur wird oft nur knapp erreicht, häufig unterschritten. Die Ursachen kann nicht eindeutig festgestellt werden, möglicherweise konnte die Dämmschicht hier nur in verminderter Stärke ausgeführt werden; denkbar ist auch, dass der Bauteilaufbau eine höhere Wärmeleitfähigkeit als erwartet aufweist. Im Bereich des unteren Anschlusses scheint ein ähnlicher Kontakt von Blendrahmen und Rollschicht vorzuliegen wie im DG.

Die zuvor bereits thematisierte begrenzte Aussagefähigkeit aufgrund der nur kurzen Nutzungsphasen gilt auch für die Laibungstemperaturen. Eine qualitative Aussage erscheint aber dennoch möglich. Unbestreitbar waren die Bauleranzen der Fensteröffnungen bedeutend. Gleichwohl liegt hier ein starker Hinweis vor, dass die wirtschaftlich wünschenswerte Verwendung vieler gleichartiger Fensterelemente einer sorgfältigen Ausführung aller Details und Bauteilanschlüsse (Fensteranschluss an die Dämmebene) nicht im Wege stehen darf. Aus den gemachten Beobachtungen kann gefolgert werden, dass ausreichend hohe Oberflächentemperaturen mit dem gewählten Dämmsystem dann zuverlässig erreicht werden, wenn die Laibungsdämmungen wie vorgesehen (40 mm stark bis an den Blendrahmen) ausgeführt werden. Die besondere Bedeutung sorgfältiger Detailplanung und Bauüberwachung bei Innendämmmaßnahmen muss hier nochmals unterstrichen werden.



## Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau – Regelfläche

Die für die dauerhaft schadenfreie Funktion der Innendämmung besonders bedeutenden Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau der Regelfläche wurden mit Temperatur/Feuchte Kombifühlern aufgezeichnet. Diese messen die in dem kleinen Luftvolumen der Teflon-Sinterkappe des Sensorkopfes auftretende Ausgleichsfeuchte als Maß für die Wasseraktivität im umgebenden Bauteil. Erfasst wurde die Feuchte der Mauerwerkswand in ca. 3 cm Abstand von der Außenoberfläche, was Aufschluss über Feuchteinträge und Trocknungsvorgänge von dieser Seite gibt. Daneben wurde die für Innendämmungen kritische Grenzschicht zwischen Mauerwerks-Innenoberfläche und Dämmaufbau mit einem weiteren Sensor überwacht. Die Abbildungen zeigen eine Übersicht der im Auswertzeitraum beobachteten Werte.



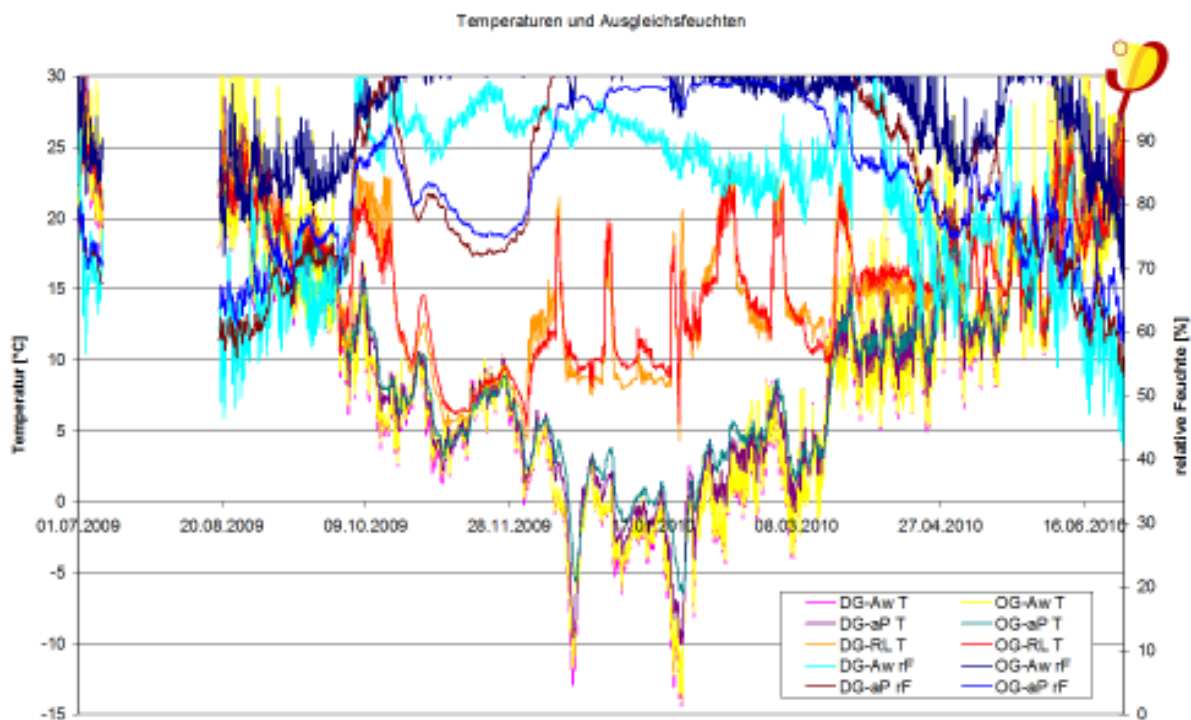
Verlauf von Temperatur/Feuchte im Mauerwerk Außenwand Regelfläche **Abbildung 33**

Wie zunächst zu erwarten liegen im Sommer deutlich geringere Feuchten vor als im Winter und die in der Außenwand gemessene Temperatur ist eng an die Außentemperatur gekoppelt. Die relative Feuchte im Bauteil steigt gegenläufig zu den geringeren Temperaturen im Herbst an und fällt im Frühjahr wieder ab. Dieses Schema wird an einigen Zeitpunkten durch andere Effekte überlagert. Es liegt nahe, für einzelne kurzzeitig starke Feuchteanstiege Schlagregenereignisse als Ursache zu vermuten. Für die Messtelle im DG ist dies für zwei Zeitpunkte anfang und ende



März 2010 belegbar, allerdings wurde auch mehrere Schlagregenereignisse aufgezeichnet, für die kein erkennbarer Einfluss auf die Feuchteverhältnisse der Wand vorliegt. Der generelle Trend zu höherer Schlagregenmenge in gleichmäßigerer zeitlicher Verteilung für die Messtelle im OG macht die dort dauerhaft höheren Wandfeuchten plausibel. Auch der im Mai 2010 zu beobachtende rasche Anstieg der Feuchte nach einer vorausgehenden Trocknungsperiode weist auf eindringendes Wasser hin. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Hydrophobierung, wiewohl vorhanden, doch nicht vollständig in der Lage ist, ein Eindringen von Wasser zu unterbinden. Obwohl die Mauerwerksfugen im Lauf der Sanierung ausgebessert wurden, können auch Risse und Spalte vorhanden sein, die Wasser in das Mauerwerk gelangen lassen.

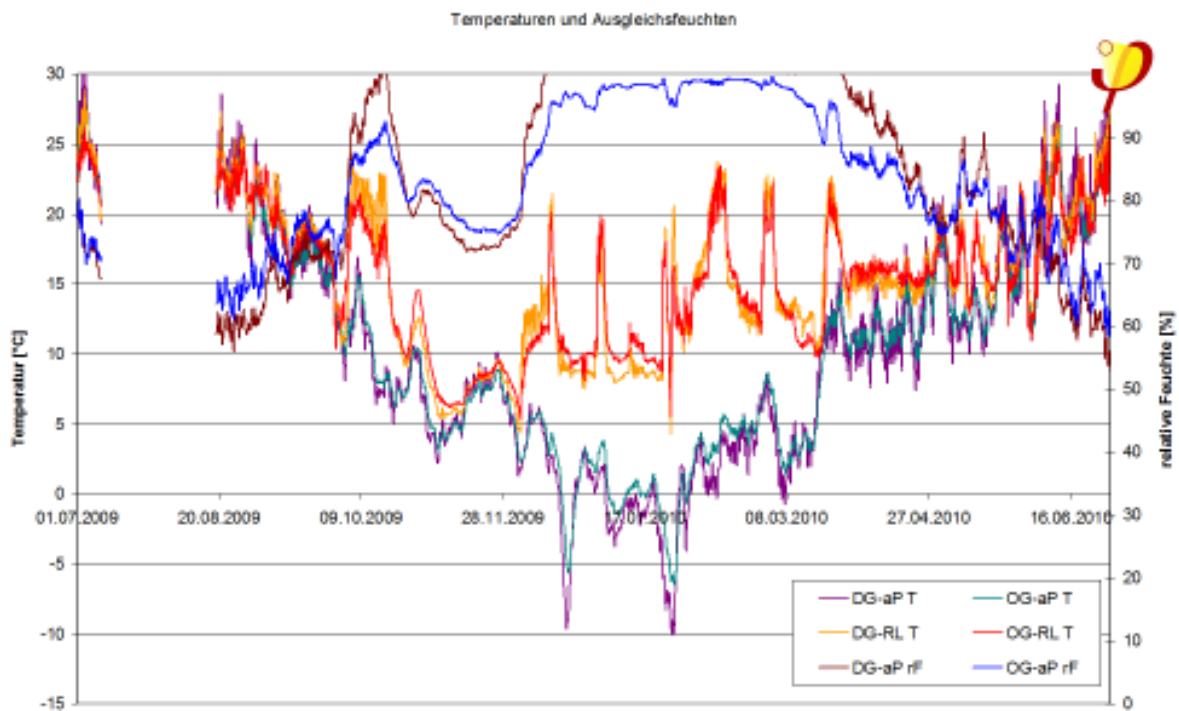
Die gemessenen Wandfeuchten sind insgesamt hoch, gleichzeitig ist die Austrocknung im Sommer ausgeprägt.



Verlauf von Temperatur/Feuchte in verschiedenen Schichten der Außenwand Regelfläche, Übersicht

Abbildung 34

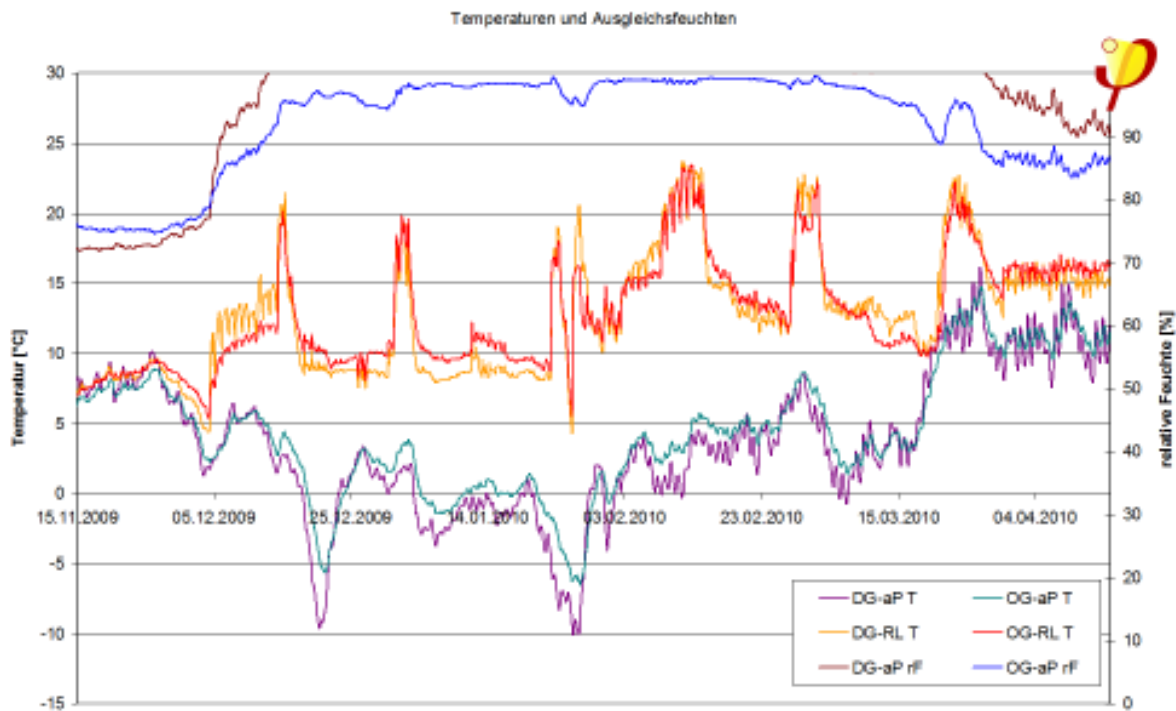
Auch kann noch ein Anteil Baufeuchte vorhanden sein. Insgesamt wäre ein solches Szenario für Sanierungen nicht ungewöhnlich. Es ist daher aufschlussreich, die Entwicklungen in der feuchteempfindlichen Dämmschicht selbst näher zu betrachten.



Temperatur/Feuchte Grenzschicht Regelfläche Übersicht

Abbildung 35

Auch in der Grenzschicht zwischen Mauerwerk und Innendämmung wurden während der Sommer ausgeprägte Austrocknungsvorgänge gemessen. Die relative Feuchte fällt jeweils bis auf etwa 65 % ab. Unmittelbar mit Heizvorgängen/Nutzungszeiten in der Heizperiode verbunden steigt die Feuchte jedoch steil an und verharrt während des gesamten Winters auf hohem Niveau, über 90 %. An beiden Messtellen (DG und OG) folgen die Kurven etwa dem gleichen Verlauf, sie befinden sich über lange Zeiträume im Rahmen der Messgenauigkeit (+/- 3 % bei Feuchten < 95 %, darüber sind größere Abweichungen möglich) auf etwa gleichem Niveau. Insbesondere in den Übergangszeiten treten erkennbare Unterschiede auf. Trotz der höheren Mauerwerksfeuchten tendiert die Messtelle im OG zu den geringeren Feuchten in der Grenzschicht. Dies kann durch die größere Mauerwerksstärke begründet sein. In beiden Fällen steigt die Ausgleichsfeuchte im Winter auf sehr hohe Werte an. Dieses Verhalten befindet sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von [Kautsch 2006]. Dort wurde während der Heizperiode eine Raumluftfeuchte von ca. 50 % künstlich eingestellt um die Konstruktion zu testen. Ähnlich hohe Feuchten lagen, wie weiter oben gezeigt, im Speichergebäude vor.



Temperatur/Feuchte Grenzschicht Regelfläche, Heizperiode

Abbildung 36

Die Messwerte weichen dagegen von den thermisch-hygrischen Simulationsergebnissen in [AkkP 32] ab, wonach für eine Zellulose-Innendämmung  $a_w=0,8$  auch unter ungünstigen Bedingungen nicht überschritten werden sollte. Nach den Messwerten werden sogar 95 % r.F. über Monate überschritten. Ursache ist vermutlich das unterschiedliche Verhalten verschiedener Zelluloseprodukte. Der Grundlagenstudie in [AkkP 32] lagen Daten für ein einblasfähiges Zelluloseprodukt aus der Materialdatenbank von [DELPHIN] zu Grunde, im Speichergebäude wurde ein anderes, aufgesprühtes Produkt eingesetzt.

Die kapillare Rücktransport-Kapazität ist bei dem untersuchten Produkt offenbar geringer als bei dem in [DELPHIN] hinterlegten Produkt, so dass es zu einer stärkeren Auffeuchtung über die Heizperiode kommt, die jedoch über die warme Jahreszeit wieder vollständig austrocknet. Für eine bleibende Auffeuchtung finden sich keine Hinweise, das Feuchteminimum 2010 liegt sogar noch etwas (ca. 3 %) niedriger als 2009. Die bilanzielle Funktionsfähigkeit über den Jahreszyklus scheint damit gegeben. In weiteren Arbeiten schlagen wir vor, künftig die Betrachtungen aus [AkkP 32] unter Nutzung der in [Kautsch 2006] ermittelten Materialparameter für das Aufsprühprodukt nachzuvollziehen und mit den gewonnenen Messdaten abzugleichen. Dies liegt jedoch außerhalb der Möglichkeiten der vorliegenden messtechnischen Untersuchung. Weiterhin sollte der Einfluss des Aufsprühvorganges und des verwendeten Leims auf die kapillaren Feuchtetransportmechanismen im Material detailliert untersucht werden.

Ob die gemessenen hohen Feuchten auf Dauer zu einer Schädigung der Konstruktion führen können, ist von besonderer Bedeutung für ihre breite Anwendbarkeit. Die wesentliche Gefahr geht dabei von einer Schimmelpilzbildung in der Grenzschicht aus. Die Bedingungen für eine Ausbreitung von Schimmelpilzen in Baustoffen sind in [Sedlbauer 2001] zusammengestellt. Organisches Substrat ist in Form der Zellulose und des Bindemittels (Leim) reichlich vorhanden. Ausreichend Feuchte ist nach den Messungen im Schlosspeicher Wartin ebenfalls über lange Zeiträume verfügbar, wenn auch bei geringen Temperaturen von 5 °C und da runter. Zudem ist das Material mit pilzhemmenden Mitteln behandelt (Borsäure sowie Borpenta-hydrat/Ammoniumphosphat). So lange diese Imprägnierung wirksam ist, wird ein Befall unterbunden. Es ist jedoch über die Zeit nicht auszuschließen, dass mit dem Feuchtetransport im Bauteil lokal die Konzentration der Imprägnierung vermindert wird. Auch unter einer solchen Annahme muss jegliches Wachstum im Sommer bei geringen Feuchten zum Erliegen kommen und kann in der Winterzeit temperaturbedingte nur langsam erfolgen. Eine rasche Ausbreitung von Schimmelpilzen ist auf diesem Hintergrund nicht zu erwarten. Da entsprechende Sporen aber auf der alten Wandoberfläche mit Sicherheit vorhanden sind, kann bei langfristiger Betrachtung ein Befall nicht ausgeschlossen werden.

Mit diesem Hintergrund ist auch die potentielle Robustheit der Konstruktion hinsichtlich von Imperfektionen der Ausführung zu bewerten, da sie bereits im ungestörten Fall hohe Feuchten im Bauteil aufweist. Die Robustheit erscheint insofern gegeben, als ein Austrocknen der Konstruktion im Sommer sehr gut möglich ist. Die Voraussetzungen für eine langsame Schimmelpilzbildung im Bauteil sind jedoch grundsätzlich gegeben, sie wird im Wesentlichen durch die zugesetzten Schutzmittel unterbunden.

Ein zuverlässiger konstruktiver Schutz des Innendämmaufbaus vor Schimmelpilzbefall, wie er für das in [AkkP 32] untersuchte Material mit Wasseraktivitäten  $< \max. 0,8$  berechnet wurde, ist im hier untersuchten Fall nicht gegeben.

Während die Dämmung durch ihre Behandlung mit Schutzmitteln eine vermutlich beträchtliche Widerstandsfähigkeit gegen Schimmelpilzbefall aufweist, können angrenzende Bauteile durch die winterliche Feuchtebelastung möglicherweise stärker beeinträchtigt werden. Von besonderem Interesse sind konstruktive Holzbauteile, etwa die Deckenbalken. Die zur Minderung von Feuchteinträgen in den Bereich des Balkenkopfes angebrachten Dichtkrägen gewinnen vor diesem Hintergrund zusätzlich an Bedeutung. Eine Betrachtung zu den gemessenen Holzfeuchten folgt weiter unten in diesem Bericht.

## Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau – Fensteranschlüsse

Von besonderem Interesse für eine Einschätzung der Stabilität des untersuchten Dämmsystems ist das Feuchteverhalten der Anschlusspunkte. Ein Standarddetail ist hierbei der Fenstereinbau. Gerade bei denkmalgeschützten Gebäuden, deren Außenansicht nicht verändert werden darf, befinden sich die Fenster an einer themisch ungünstigen Position im Verhältnis zur Innendämmschicht. Der Ebenenversprung durch den Einbau des Fensters in der Laibung führt zu erhöhten Wärmeverlusten (Wärmebrücken). Um dies zu mildern und um Feuchteschäden an kalten Oberflächen der Laibung zu vermeiden ist es zwingend, einen Anschluss der Dämmschicht an das Fenster zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wird die Dämmschicht auch in der Laibung ausgeführt und an den Fensterrahmen herangeführt. Ebenso wird die luftdichte Innenputzschicht bis an das Fenster geführt und dort luftdicht verbunden.

Aus Platzgründen ist im Allgemeinen im Laibungsbereich nur eine verminderte Dämmstärke möglich, im vorliegenden Fall wurde auf die halbe reguläre Stärke reduziert (damit sind im Laibungsbereich 40 mm Dämmstärke planerisch vorgesehen). Auf Grund dieser bereits verminderten Dämmstärke, die durch Bautoleranzen auch gefährdet ist, nicht an jedem Fenster gleich stark ausgeführt zu werden, können Feuchteprobleme hier besonders ausgeprägt auftreten. Es zeigt sich einmal mehr die Bedeutung einer sorgfältigen Bauüberwachung, die die Einhaltung der Mindeststärke sichert.

Im Folgenden soll das gemessene Verhalten der ausgeführten Konstruktion betrachtet werden.

Wie auch in der Regelfläche wurde Temperatur/Feuchte Kombifühler auf der kalten Seite der Dämmschicht in die Konstruktion eingebracht. Die Abbildung zeigt beispielhaft einen solchen Fühler vor Anbringung der Dämmung.



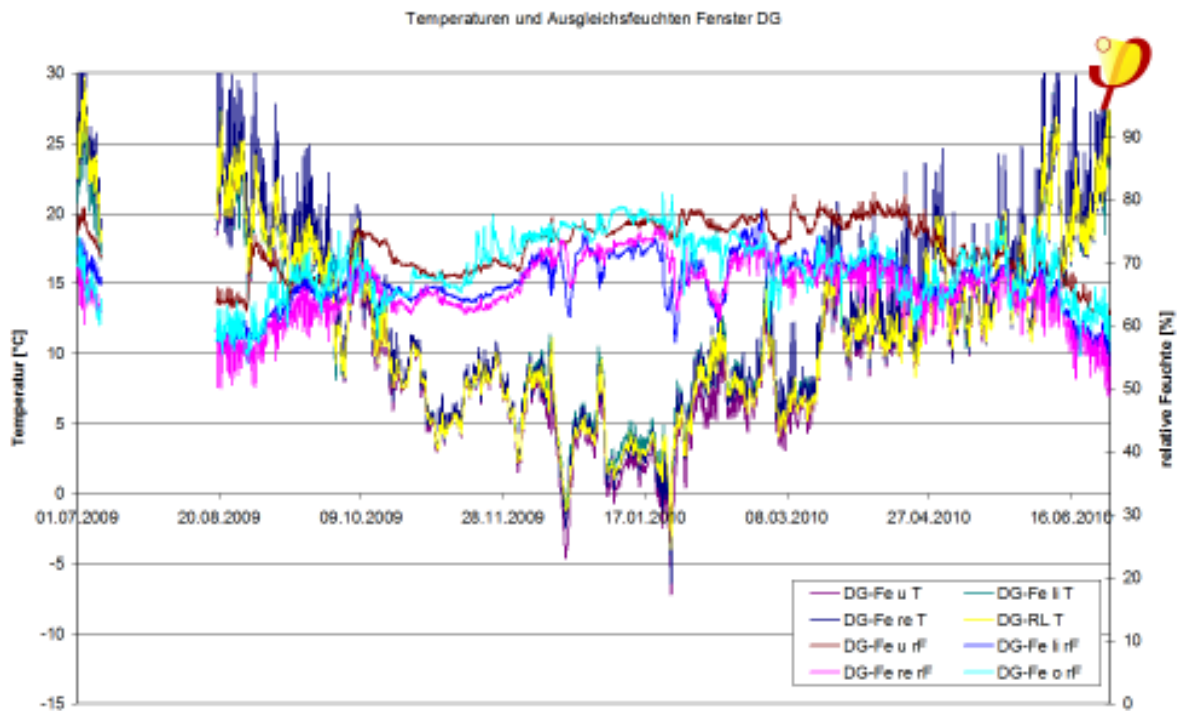
Lage des Temperatur/Feuchte Fühlers in der Fensterlaibung OG

Abbildung 37

Die folgenden Abbildungen zeigen die an den untersuchten Fenstern jeweils gemessenen Temperaturen und Ausgleichsfeuchten.

Rund um das Fenster im DG zeigt die Feuchteentwicklung ein gutmütiges Verhalten. Eine Ausgleichsfeuchte von 80 % wird nicht überschritten. Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass die seitlichen Laibungen durchweg geringere Feuchten aufweisen als der Sturz und insbesondere die Sohlbank. Wie weiter oben festgestellt, weist die Sohlbank auch die geringsten Temperaturen auf, vermutlich durch den Einfluss der gemauerten Rollschicht und die dort nur geringe Dämmstärke. Wegen der dort geringeren Temperaturen wird der untere Fensteranschluss am stärksten mit Feuchte belastet. Die Messwerte deuten jedoch nicht auf eindringendes Regenwasser hin, das DG-Fenster ist durch den unmittelbar darüber befindlichen Dachüberstand sehr geschützt angeordnet.

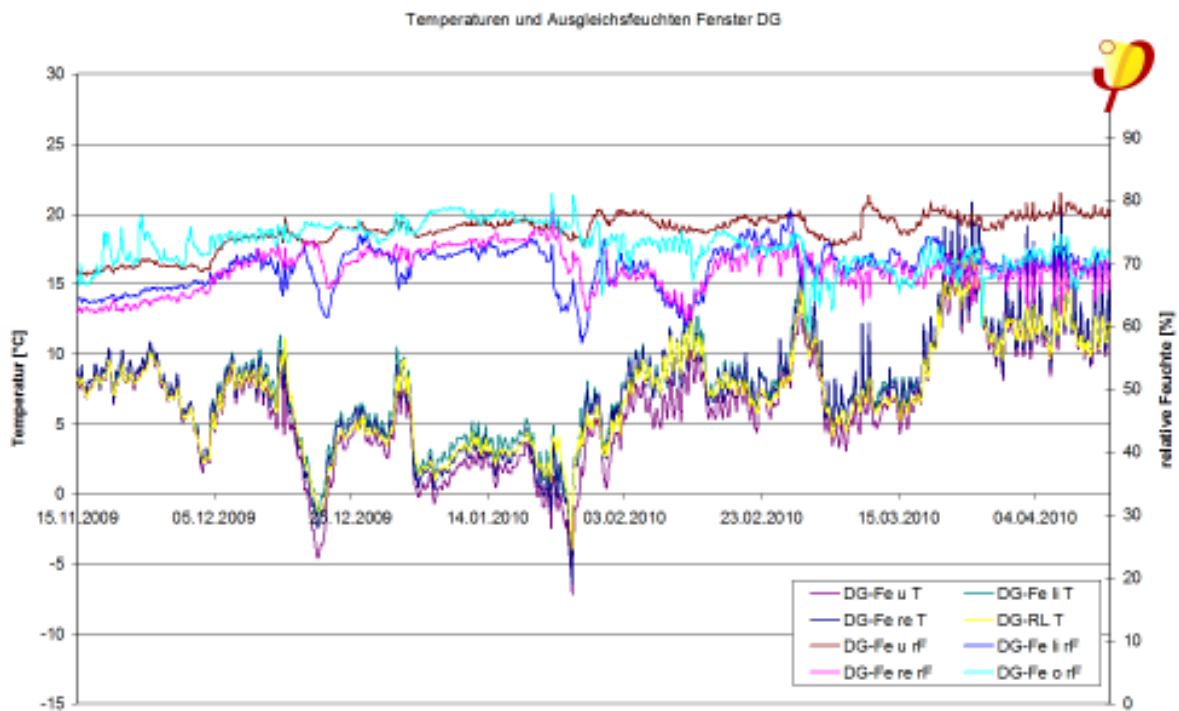




Temperatur/Feuchte Grenzschicht Fensterlaibung DG, Übersicht

Abbildung 38

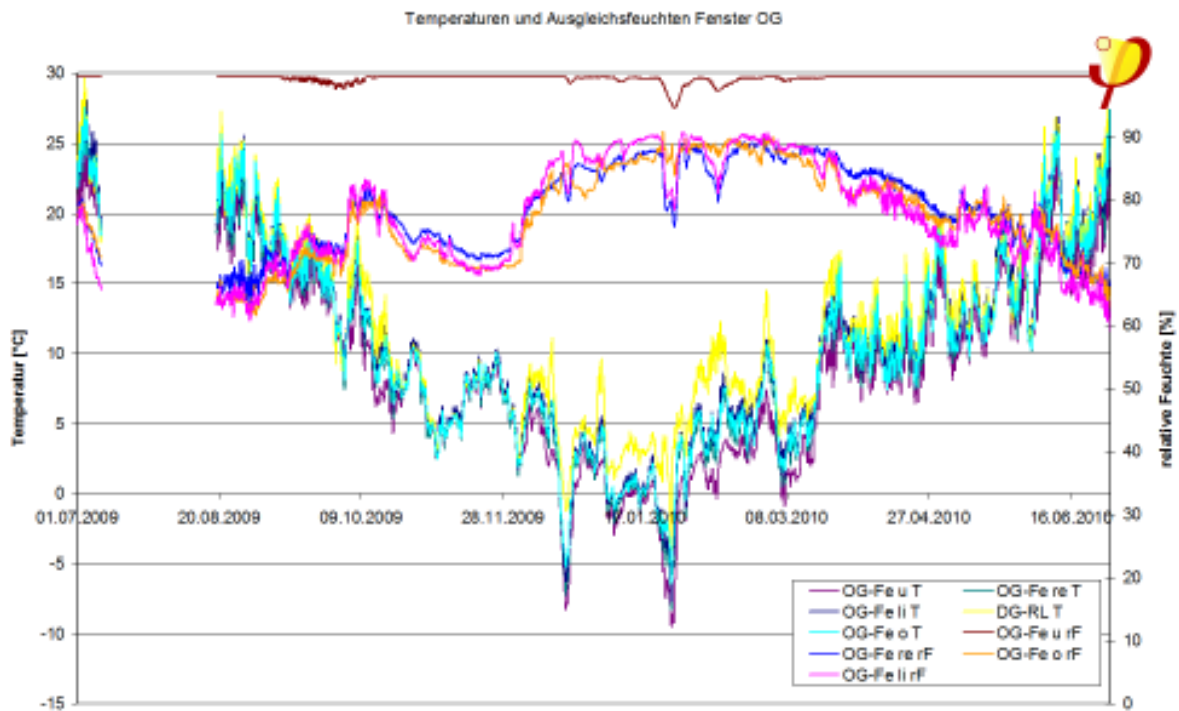
Wie im Kapitel zur Temperaturentwicklung der Fensteranschlüsse dargestellt, wurden an den seitlichen Anschlüssen des DG-Fensters Hartschaumplatten als Toleranzausgleich eingesetzt. Das Temperaturniveau an der jeweiligen Messtelle wird dadurch angehoben, was auch einen Einfluss auf die lokalen Feuchteverhältnisse ausübt. Da Sturz und Sohlbank keine wesentlich höheren Werte aufweisen, kann insgesamt eine unkritische Situation des Fenstereinbaus DG erkannt werden.



Temperatur/Feuchte Grenzschicht Fensterlaibung DG, Winter

Abbildung 39

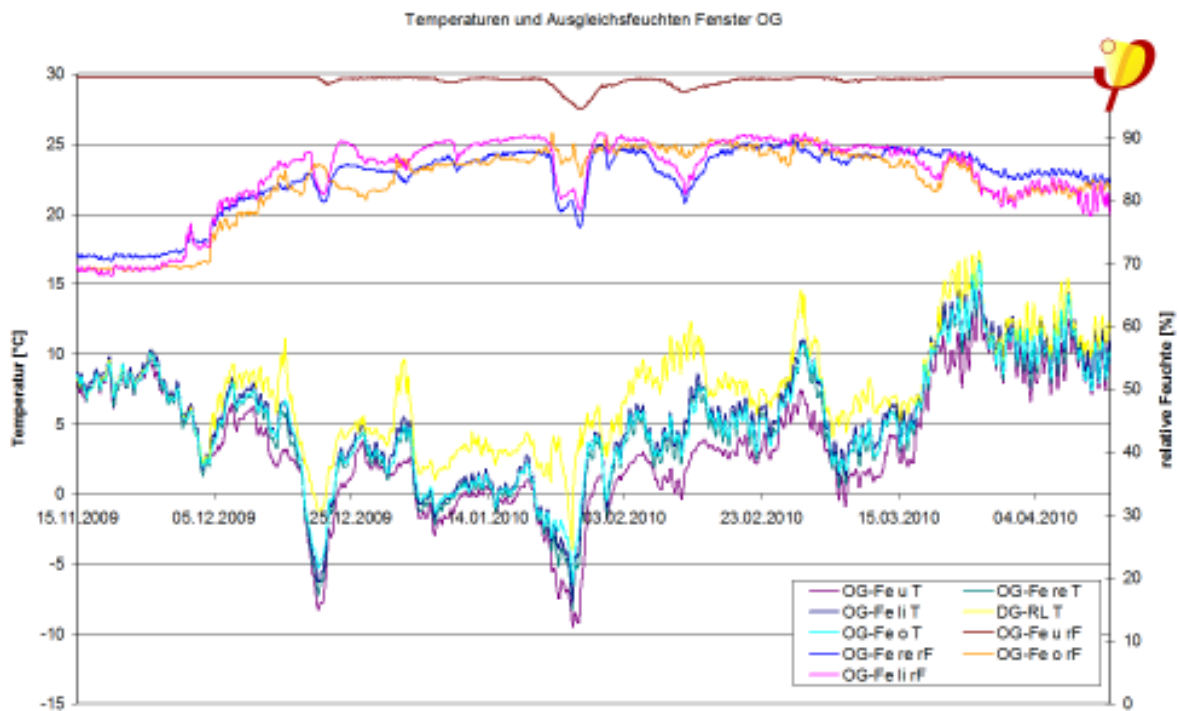
Anders als im DG liegt das Niveau der Messwerte der Ausgleichsfeuchte im OG deutlich höher. Es folgt dem an der Regelfläche beobachteten Verlauf, wenn auch die Werte etwas geringer ausfallen. Seitliche Anschlüsse und Sturz befinden sich in guter Übereinstimmung, der untere Anschluss zeigt dagegen dauerhaft eine Ausgleichsfeuchte in oder nahe der Sättigung.



Temperatur/Feuchte Grenzschicht Fensterlaibung OG, Übersicht

Abbildung 40

Auch im Sommer ist dort keine Austrocknung festzustellen. Dies verwundert und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein fehlerhaftes Messsignal vorliegt. Sofern die Messwerte jedoch korrekt sind, liegt die Vermutung einer Undichtheit nahe: möglicherweise dringt hier Regenwasser von außen ein. Wie auf dem Foto der Einbausituation weiter oben erkennbar, wurde die neue Fensterbrüstung samt Sohlbank erst nach dem Fenstereinbau gemauert. Ein erheblicher Anteil Herstellungsfeuchte im Mauerwerk kann daher auch nicht ausgeschlossen werden. Dass in der Sommerperiode keinerlei Austrocknungstendenz feststellbar ist, spricht jedoch gegen die Herstellungsfeuchte als alleinige Ursache.

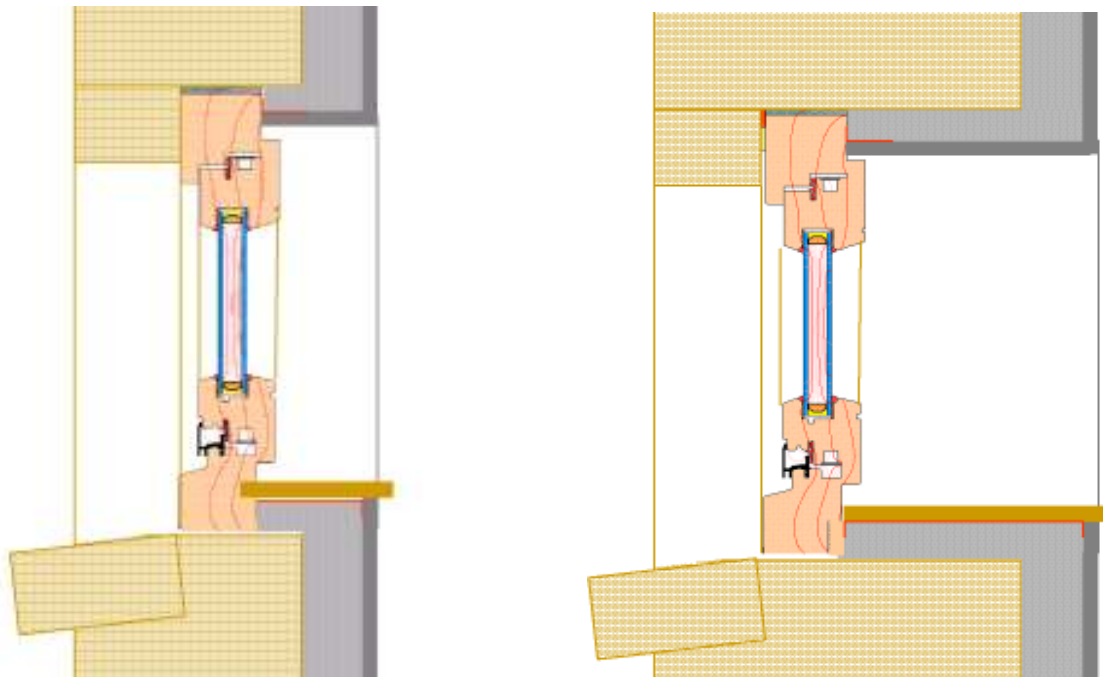


Temperatur/Feuchte Grenzschicht Fensterlaibung OG, Winter

Abbildung 41

Wie in der Regelfläche werden rund um das Fenster OG über Monate Ausgleichsfeuchten jenseits von 80 % gemessen. Diese saisonale Aufwechslung scheint im Sommer vollständig auszutrocknen, bilanziell scheint also auch hier im Jahresverlauf die Funktionsfähigkeit gegeben. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Konstruktion gelten die für die Regelfläche formulierten Abhängigkeiten von der Wirksamkeit der chemischen Ausrüstung.

Es bleibt die Frage nach der Ursache des deutlichen Unterschiedes zwischen den Messwerten des Fensters DG und des Fensters OG von ca. 10 % r.F. Neben der Ausfütterung mit Hartschaumstreifen weist das DG-Fenster aufgrund der geringeren Mauerstärke die Besonderheit einer besonders geringen Laibungstiefe auf. Die Laibungstiefe beträgt nur ca. 10 cm. Geometrisch besteht somit in unmittelbarer Nähe der Messstellen eine Ecksituation, die durch größere Oberfläche zum Raum, den kapillaren Rücktransport bzw. eine Austrocknung begünstigt, zudem ist durch die Geometrie von einer erhöhten Temperatur auszugehen. Im Fall der OG-Situation, wo eine Laibungstiefe von ca. 25 cm vorliegt ist dieser ECKEINFLUSS auf den Fensteranschluss zumindest in deutlich geringerer Größenordnung zu erwarten.



Laibungssituationen DG (links) und OG (rechts), schematisch

Abbildung 42

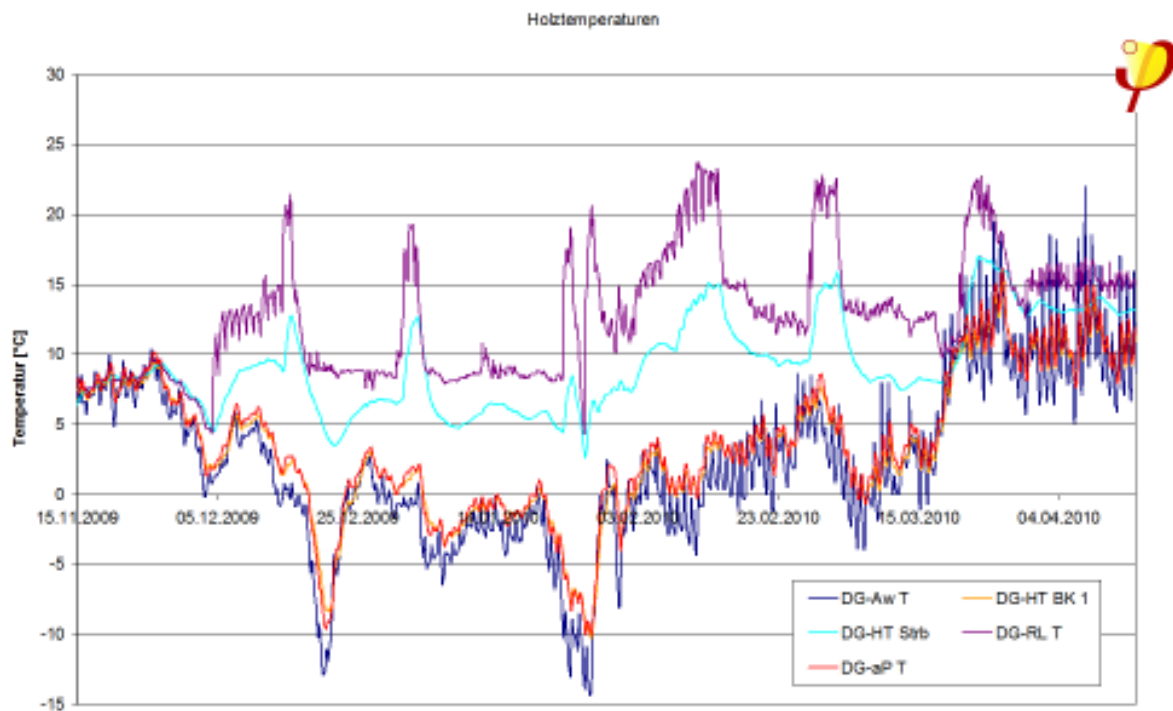
## Holzfeuchte

Die Feuchte konstruktiver Holzbauteile wurde an sechs Messtellen durch elektrische Feuchtemessung mit fest installierten Elektroden gemessen. Die Messung wurde manuell ausgelöst.

## Temperatureinfluss

Die durch elektrische Widerstandsmessung bestimmte Holzfeuchte wird durch mehrere Parameter beeinflusst, einen guten Überblick hierüber bietet [Du 1991]. Von besonderer Bedeutung ist die Holztemperatur. Um eine Temperaturkorrektur der für eine konstante Referenztemperatur von ca. 20 °C gemessenen Holzfeuchtwerte zu ermöglichen, ist die Kenntnis der tatsächlich vorliegenden Temperaturen erforderlich. Diese wurde daher an zwei repräsentativen Messtellen separat erfasst, hierzu wurden Pt100 Sensoren in die Hölzer so eingebaut, dass sie in der Nachbarschaft der jeweiligen Holzfeuchte-Messtrecke liegen.

Bei den untersuchten Hölzern handelt es sich um Kanthölzer aus Kiefer, die Deckenbalken weisen einen Querschnitt von 200/200 mm auf.



**Holztemperaturen im Vergleich mit Temperaturen anderer Messtellen**

**Abbildung 43**

Orange die Holztemperatur eines Balkenkopfes, annähernd identisch mit der magentafarben dargestellten Temperatur der Grenzschicht von Mauerwerk und Innendämmung. Hellblau die deutlich verschiedene Temperatur des Deckenrandbalkens.

Die Grafik zeigt die gemessenen Holztemperaturen für einen Balkenkopf (DG-HT BK1) und einen Decken-Randbalken (DG-HT Strb), der lateral ca. zur Hälfte in der Dämmschicht angeordnet ist. Die Temperatur des Balkenkopfes entspricht in sehr guter Näherung der in der Grenzschicht von Mauerwerk und Innendämmung gemessenen Temperatur (DG-aP T), so dass es für zukünftige Fälle ähnlicher Geometrie zulässig erscheint, diese Temperatur zur weiteren Beurteilung heranzuziehen. Der Zusammenhang gilt ganzjährig, der besseren Lesbarkeit wegen ist im Diagramm nur die Heizperiode dargestellt. Dagegen weist der Decken-Randbalken einen gedämpft an die Raumtemperatur gekoppelten Temperaturgang auf. Mit wachsender Differenz von Innen- und Außentemperatur steigt auch die Differenz der Holztemperatur von der Raumtemperatur an. In derartigen Fällen erscheint die separate Messung der Holztemperatur geboten.

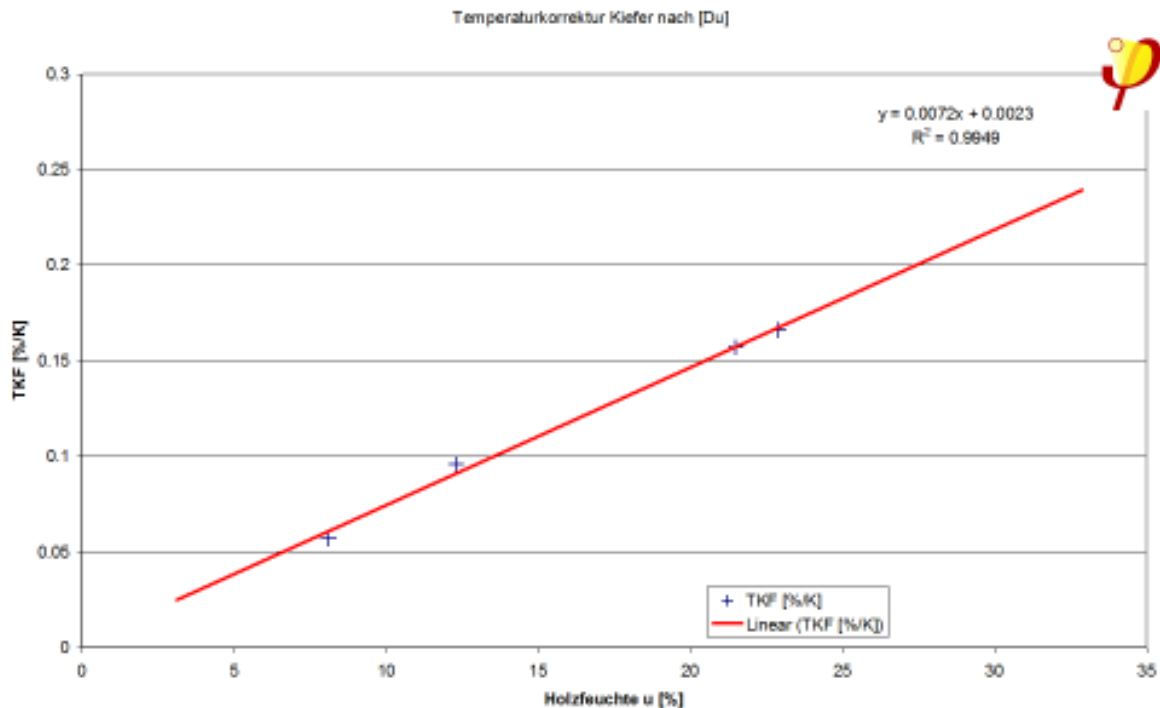
Der Temperatureinfluss auf die elektrische Holzfeuchtebestimmung kann durch Temperatur-Korrekturfaktoren (TKF) berücksichtigt werden. Nach [Du 1991] betragen diese für Kiefernholz



Temperaturkorrekturfaktoren für elektrische Holzfeuchtemessung an Kiefernholz nach [Du 1991] Tabelle 4.

Kiefer	Holzfeuchte u [%]	TKF [%/K]
	8,1	0,057
	12,3	0,096
	21,5	0,157
	22,9	0,166

Das Diagramm zeigt die TKF als Funktion der Holzfeuchte und die dafür bestimmte Ausgleichsgerade, wie sie für die Auswertung verwendet wurde.



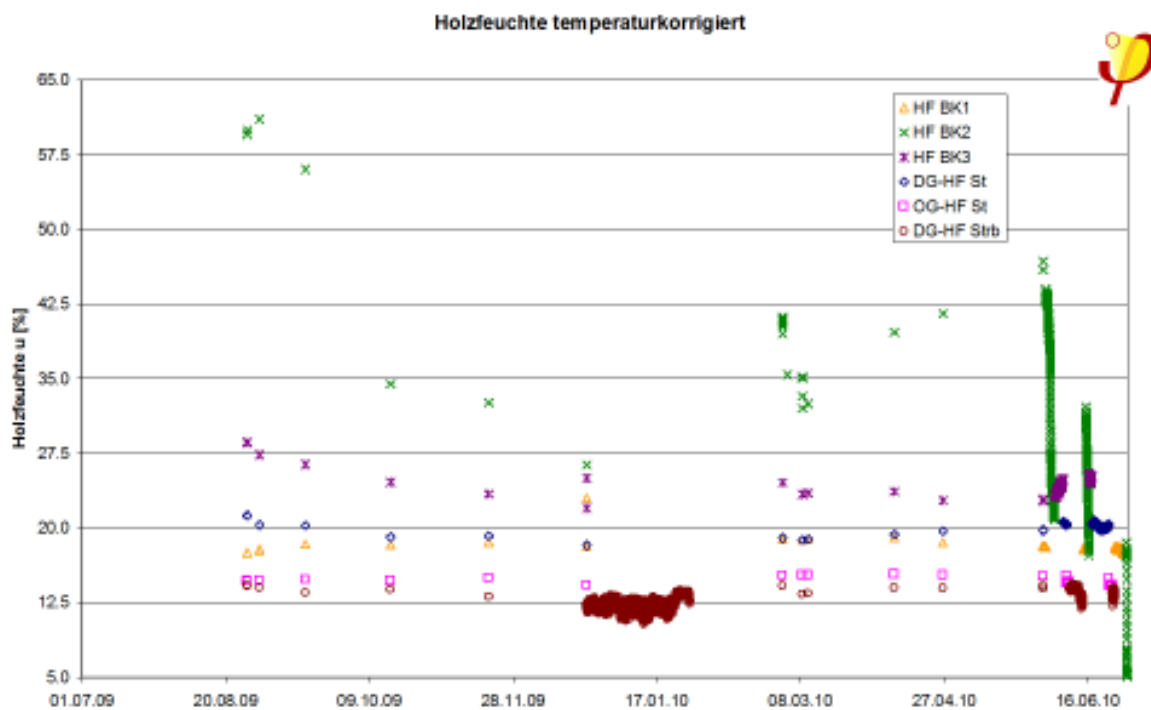
Funktion des Temperaturkorrekturfaktors nach [Du 1991]

Abbildung 44

Es bleibt zu beachten, dass die elektrische Holzfeuchtemessung nur eine Genauigkeit um +/- 2 % erwarten lässt. Da sie auf einer Widerstandsmessung im Bereich von  $10^6$  bis  $10^{12} \Omega$  beruht, kann sie bereits durch kleine Störungen der Messleitungsisolierung beeinträchtigt werden. Bei der Planung der Messung wurde daher auf möglichst geringe Leitungslängen geachtet, besonders gut isolierte Leitungen wurden vorgesehen. Dies konnte dann am Bau nicht vollständig umgesetzt werden, da kurzfristig und ohne Rückmeldung die Grundrisse wesentlich verändert ausgeführt worden waren. Durch die zeitlichen Zwänge des Bauablaufes war es unumgänglich, die Messleitun-

gen deutlich zu verlängern und dafür auch Material üblicher Qualität zu verwenden, wenn nicht vollständig auf die Holzfeuchtemessung verzichtet werden sollte. So sind die auf diesem Weg gewonnenen Messwerte kritisch zu würdigen. Jeder durch einen verringerten Isolationswiderstand entstandene Fehler zieht einen zu hohen Holzfeuchtemesswert nach sich. Sofern der Isolationswiderstand nicht selbst in erheblichem Maß Feuchte- und Temperaturabhängig ist (was hier nicht angenommen wird), kann er als Aufschlag auf den tatsächlichen Holzfeuchtwert wahrgenommen werden, die wirkliche Holzfeuchte wird also tendentiell geringer als der Messwert sein.

Die mit TKF temperaturkorrigierten Holzfeuchtemesswerte zeigt die folgende Abbildung.



**Holzfeuchtemesswerte im Auswertzeitraum**

**Abbildung 45**

Die Messwerte des Decken-Randbalkens (DG-HF Strb), der Stütze im OG (OG-HF St) und des Balkenkopfes 1 (HF BK1) liegen im gesamten Auswertzeitraum zum Teil deutlich unter 20 % Holzfeuchte (u) und können damit als unkritisch gelten. Die Messwerte unterliegen keiner signifikanten jahreszeitlichen Schwankung.

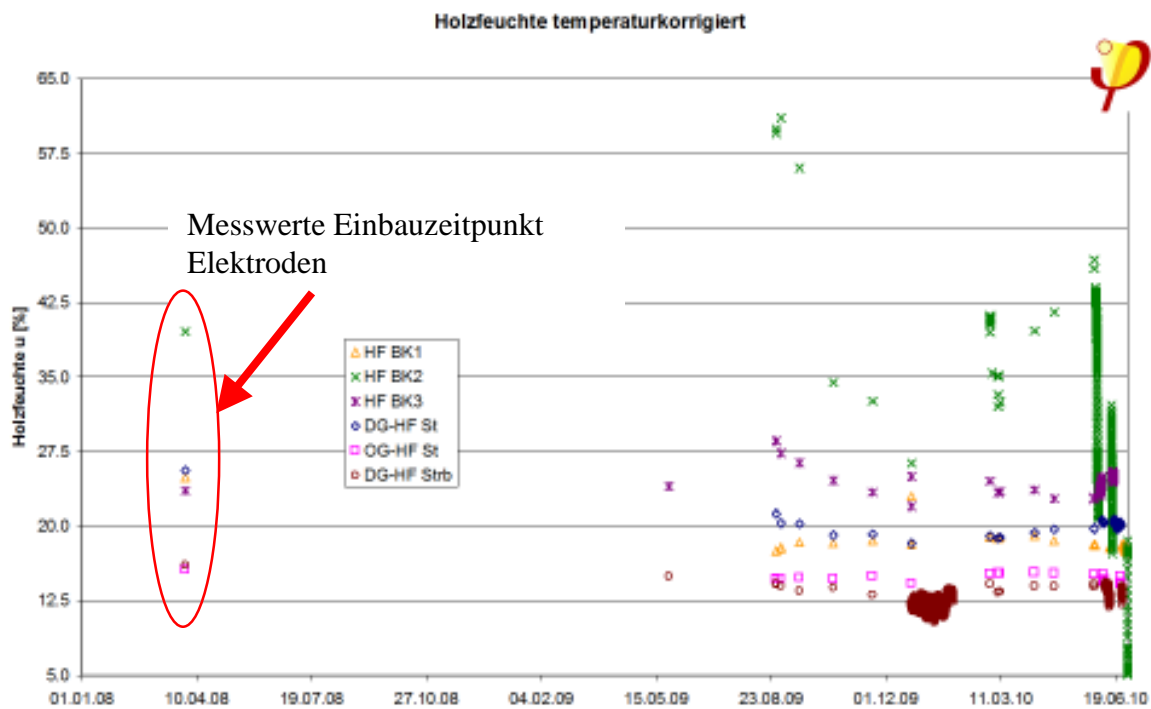
Demgegenüber überschreitet die Holzfeuchte der Stütze DG zeitweilig die kritische Marke von 20 % u, die gemäß DIN 68800 (Holzschutz) nicht für längere Zeit (6 Monate) überschritten werden darf. Dies ist hier noch nicht der Fall, Überschreitungen kommen nur während kurzer Zeiträume vor. Unter Berücksichtigung der den

Messwert tendentiell nach oben beeinflussenden Auswirkung der langen Kablstrecke kann die Situation dieser Stütze nach den Messwerten als noch akzeptabel gelten.

Fragen werfen die zwei übrigen Messtellen auf. Die Werte der Messtelle Balkenkopf 3 (HF BK3) liegen dauerhaft überhalb von 20 % u und sind damit kritisch hoch. Es kann eine leicht fallende Tendenz erkannt werden, möglicherweise erfolgt eine langsame Trocknung. Die Höhe einer Verschiebung der Messwerte durch Effekte der Messleitung kann nicht quantifiziert werden. Es muss daher von überhöhter Feuchte ausgegangen werden. Dies sollte am Bauwerk mittels zusätzlicher Untersuchungen geprüft werden um Bauschäden zu verhindern.

Ein wenig plausibles Bild zeigen die Messwerte für den Balkenkopf 2 (HF BK2). Diese sind dauerhaft sehr hoch und unterliegen starken Schwankungen. Hier liegt mit einiger Wahrscheinlichkeit ein Fehler des Messaufbaus vor. Sollten die Werte nicht wesentlich verfälscht sein, liegen sie in einem Bereich, für den die elektrische Holzfeuchtemessung nur noch sehr geringe Genauigkeit aufweist. Davon unabhängig wäre sie so hoch, dass von einem drohenden Bauschaden ausgegangen werden müsste. Auch hier sollte eine nähere Untersuchung am Bauwerk vorgenommen werden.

Unmittelbar nach Einbringen der Elektroden in das jeweilige Bauteil wurde eine erste Messung mit einem tragbaren Handmessgerät (Fabrikat Gann Hydromette, Kennlinie für Kiefernholz wurde eingestellt) vorgenommen. Dabei fanden nur die zum Gerät gehörigen, ca. 1 m langen Messleitungen Verwendung. Das Gebäude befand sich noch im Rohbaustadium und war über lange Zeit unbeheizt. Die Abbildung zeigt die gewonnenen Messwerte im Vergleich zu den zuvor betrachteten Werten der Dauer-messung.



Holzfeuchtemesswerte im Auswertzeitraum

Abbildung 46

Auch in dieser Messung mit einem anderen Messgerät und ohne Unsicherheit durch lange Messleitungen weist der Balkenkopf 2 bereits eine hohe Anfangsfeuchte auf. Diese könnte durch einen Schaden in der damals noch unsanierten Fassade hervorgerufen worden sein. Auch wenn einzelne Werte der späteren Dauermessung deutlich geringer sind, kann keine eindeutige Trocknungstendenz identifiziert werden. Die Messtelle muss daher als weitaus zu feucht eingestuft werden. Weiter Untersuchung und Überwachung am Bauwerk sollten erfolgen um Schäden vorzubeugen.

Die Messwerte der übrigen Messtellen befinden sich in recht guter Übereinstimmung mit den Werten aus der Dauermessung, Balkenkopf 1 und die Stütze DG sind offenbar deutlich ausgetrocknet, während der Balkenkopf 3 in der gleichen Größenordnung verharrt.

Insgesamt ist das Ergebnis der Holzfeuchtemessungen nicht voll befriedigend. Vier der sechs Messtellen zeigen unkritische Werte, Bauschäden durch hohe Holzfeuchte können dort mit einiger Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Dem gegenüber ist die Feuchte an einer Messtelle deutlich zu hoch, wobei Unsicherheiten bestehen, ob dies durch Effekte der Messleitung verfälscht ist. Eine weitere Messtelle lieferte nur ein unsicheres Signal, der Vergleich mit der Messung zum Einbauzeitpunkt weist aber auch hier auf hohe Holzfeuchte hin. Eine deutlich längere messtechnische Überwachung könnte besseren Aufschluss über Tendenzen und Trocknungsvorgänge liefern. Kurzfristig muss eine genauere Untersuchung der als kritisch erkannten

Holzbauteile empfohlen werden um mögliche Gefahren frühzeitig zu erkennen. Dabei sollte auch berücksichtigt werden, dass nur einige Stichproben gemessen werden konnten und kein vollständiges Bild der Holzbauteile im Schlosspeicher gewonnen wurde.

Wie weit die Holzfeuchte an den einzelnen Messtellen durch eine Feuchtebelastung aus der feuchten äußeren Schicht der Zellulosedämmung beeinflusst wird, kann aus den Messdaten nicht abgeleitet werden. Durch die zu Abdichtungszwecken aufgebraachten Manschetten aus Bitumenmasse ist jedoch ein weitgehender Schutz des Holzes gegenüber dieser Feuchtequelle zu erwarten. Genauere Untersuchungen zu derartigen Detailsituationen sind erforderlich.

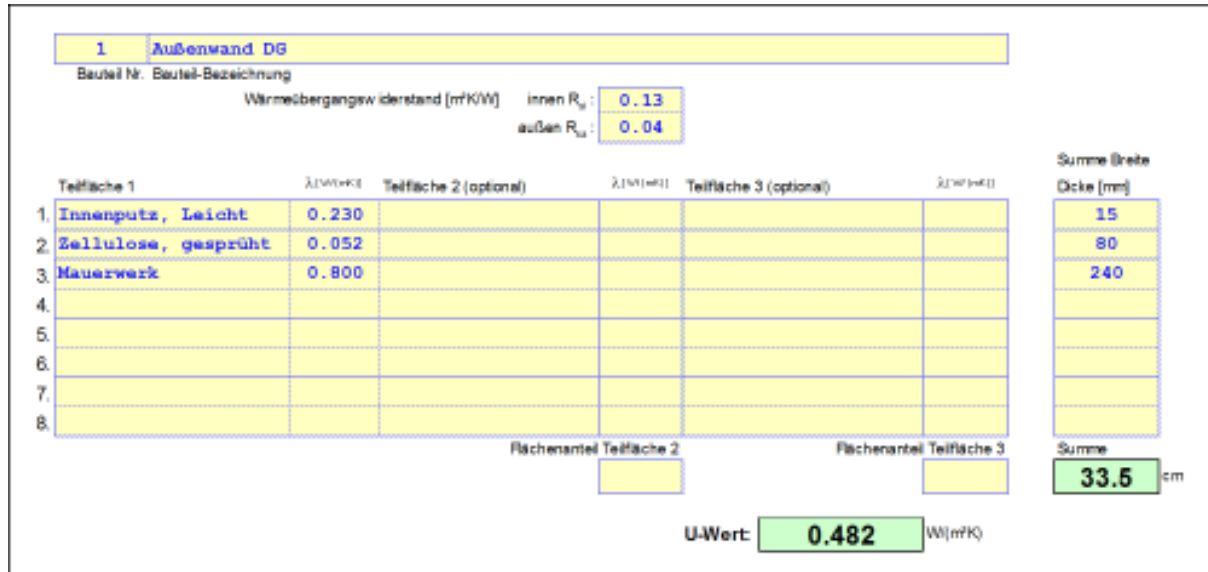
## Wärmestrom

In beiden Messräumen (DG und OG) wurden im annähernd ungestörten Wandbereich Wärmestrommessungen vorgenommen und kontinuierlich aufgezeichnet. Da für jedes Intervall die vorliegende Temperaturdifferenz zur Außenluft ebenfalls gemessen wurde, kann der Wärmestrom auf die Temperaturdifferenz bezogen dargestellt werden. Erhalten wird der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$ . Die Einzelwerte schwanken durch dynamische Einflüsse, im Mittel über einen längeren Zeitraum wird jedoch der tatsächlich vorliegende  $U$ -Wert berechnet. Für beide Messtellen wurde eine solche Auswertung durchgeführt, Bezugszeitraum ist die Heizperiode vom 15.09.2009 bis 15.03.2010. Es wurden die aus den 10-minütigen Messwerten gewonnenen Stundenmittelwerte zu Grunde gelegt (2160 Stundenwerte).

Für die Messtelle DG wurde ein Mittelwert von  $0,72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  berechnet, bei einer Standardabweichung von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Im OG wurde ein nur wenig vom DG abweichender Wert von  $0,71 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gemessen, die Standardabweichung betrug hier  $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Beide Messwerte unterscheiden sich deutlich von den jeweiligen Rechenwerten, diese betragen ca.  $0,48 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (im DG) bis ca.  $0,44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (im OG), bedingt durch die verschiedene Stärke des Mauerwerkes. Beispielhaft wird folgend die Berechnung für die Wand des DG dargestellt (OG im Anhang).



U-Wert Berechnung und Materialkennwerte Dachgeschoss

Abbildung 47

Aus der Aufstellung gehen auch die Materialkennwerte hervor. Für das Mauerwerk wurde eine typische Wärmeleitfähigkeit angesetzt, ein genauere Wert für das Objekt ist nicht bekannt. Der Einfluss der Unsicherheit an dieser Stelle in der Größenordnung von +/- 0,15 W/(mK) ist aber gering, in jedem Fall wäre ein U-Wert  $\leq 0,5$  W/(m²K) zu erwarten.

Als Ursache für den mit  $> 0,7$  W/(m²K) deutlich höheren gemessenen U-Wert muss daher eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der anderen Bauteilschichten, insbesondere der Zelloosedämmung, vermutet werden. Dies erscheint auch im Zusammenhang mit den gemessenen Feuchten plausibel. Um die Messwerte auf diese Weise zu erklären, wären auf Grundlage der angegebenen Wärmeleitfähigkeiten für Putz und Mauerwerk Werte um 0,1 W/(mK) für die Dämmschicht anzusetzen (DG 0,095 W/(mK) bzw. OG 1,2 W/(mK)). In dieser Betrachtung bleibt eine Unsicherheit durch die nicht exakt bekannte Dicke der ausgeführten Dämmschicht und des Putzes.

Die Beobachtung befindet sich in Übereinstimmung mit den Materialkennwerten für die Sprüzzellulose [Kautsch 2006]. Die Sorptionsisotherme weist für Ausgleichsfeuchten knapp unterhalb der Sättigung einen sehr steilen Anstieg auf, der Wassergehalt nimmt von ca. 0,03 m³/m³ bei 95 % Ausgleichsfeuchte immer steiler zu. Zudem ist die Wärmeleitfähigkeit stark vom Wassergehalt abhängig- es wird für einen Wassergehalt von 0,08 m³/m³ bereits eine Wärmeleitfähigkeit von 0,1 W/(mK) ausgewiesen, mit höheren Wassergehalten erfolgt ein linearer Anstieg (Steigung ca. 0,625).



Der für die Grenzschicht zum Mauerwerk gemessene Wert der Ausgleichsfeuchte in der Nähe der Sättigung gilt mit Sicherheit nicht für den gesamten Dämmstoffquerschnitt. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes wird deshalb auch nicht im gesamten Querschnitt gleichmäßig durch hohen Wassergehalt vergrößert sein. Soll der vorgefundene hohe U-Wert dennoch erklärt werden, muss die Wärmeleitfähigkeit von einem Wert in der Nähe des Nennwertes auf der Raumseite zu einem deutlich erhöhten Wert auf der kalten Seite ansteigen, der Mittelwert ergibt sich dann entsprechend den Messwerten zu ca.  $0,1 \text{ W}/(\text{mK})$ .

## 7 Literatur

[AKKP24] Feist, W. (Hrsg.), Einsatz von Passivhauskomponenten für die Altbausanierung, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, 1. Auflage 2004

[AKKP 32] Feist, W. (Hrsg.), Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten und Innendämmung, , Protokollband Nr. 32, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2005.

[Badstübner 2007] Badstübner, S. (Hrsg.), Schlösser und Gärten der Mark – Wartin, Dt. Gesellschaft e.V., Berlin 2007

[dena] Deutsche Energieagentur, dena, Das Projekt 'Sanierung Tevesstraße' war ein Bauprojekt im Projekt 'Niedrigenergiehaus im Bestand'. Dabei wurde Beispielhafte Sanierungsprojekte in einer vergleichenden Auswertung übersichtlich dokumentiert.

[DIN 4108-3] Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 2001

[Du 1991] Du, Quingping, Einfluss holzartspezifischer Eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit wichtiger Handelshölzer, Dissertation an der Universität Hamburg, Hamburg 1991

[DWD] Deutscher Wetterdienst, Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland 1981-2000, Hamburg 2004

[EnSan 2008] Holle, H.-J. / Dittert, Th. / Dürr, K. Titel: Demonstrationsvorhaben "Kleine Freiheit" in Hamburg, Abschlussbericht EnSan-Projekt, Hamburg 2008

[Feist 2002] Feist, W. John, M., Pfluger, R., Bauphysikalische Betreuung: Wärmebrückenberechnung, Diffusionsberechnung, Beratung zum Luftdichtheitskonzept, Qualitätssicherung und Energiebilanzberechnung (PHPP) für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, Oktober 2002

[Feist 2003] Feist, W. John, M., Kah, O., Passivhaustechnik im Gebäudebestand – Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003

[Feist 2003] Gebäudemodernisierung mit Faktor 10. Hier: Thermografische Nachuntersuchung für das Pilotprojekt Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003

[Feist 2007] Feist, Wolfgang: Passivhäuser in der Praxis. In: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2007. Ernst & Sohn, Berlin 2007

[Heinz 2004] Heinz, E.; Brasche, S.; Hartmann, T.; Richter, W. und Bischof, W.: Feuchtigkeitschäden einschließlich Schimmelpilz-Wachstum in deutschen Wohnungen, AIRtec 02 (2004) 1

[ISO 7730] Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005

[Kah 2008] Kah, O. Feist, W., Pfluger, R., Schnieders, J., Kaufmann, B., Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Passivhaus Institut, 2008.

[Kautsch 2006] P. Kautsch e.al., Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 84/2006 des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2006

[Meteonorm] METEOTEST, METEONORM 6.1, Globale Klimadatenbank, Bern 2009

[Peper 2007] Messtechnische Untersuchungen zum thermischen und hygrischen Verhalten der Innendämmung im Modernisierungsprojekt Sodastraße 40 / Ludwigshafen, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007

[Pfluger\_1 2004] Pfluger, R.: "Integration von Lüftungsanlagen im Bestand – Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme", in Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt, Dezember 2004

[Pfluger\_2 2004] Pfluger, R.: "Lösungen für die Kanalführung in der Bestandssanierung", in Protokollband Nr. 30, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt, Dezember 2004

[Pfluger\_3 2004] Pfluger, R., Kaufmann, B., Peper, S. Feist, W.: Wissenschaftliche Begleitung des Sanierungsprojektes der ABG Frankfurt Holding GmbH, Untersuchungen zu den Bestandsgebäuden, i. A. des HMWVL, Darmstadt, 2004

[Peper2009] Peper, S, Baumgärtner, C., Grove-Smith, J., Feist, W., Sanierung mit Passivhauskomponenten: Messtechnische Untersuchungen und Auswertung zum Sanierungsprojekt Tevesstraße, PHI, Darmstadt, 2009.

[Schnieders 2000] Schnieders, J., Sanierung eines Wohnblocks zum "Passivhaus im Bestand", Beitrag im Tagungsband zur 4. Passivhaustagung 2000, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.

[Schnieders 2001] Schnieders, J., Qualitätssicherung beim Sanierungsprojekt Brunckviertel: 3-Literhaus-Sanierung. Unveröffentlichter Projektbericht im Auftrag der LUWOG, Ludwigshafener Wohnungsbaugesellschaft, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2001

[Schulze Darup 2003] Schulze Darup, B.: Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten. – Tagungsband der 7. Passivhaus-Tagung in Hamburg, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003

[Schulze Darup 2005] Schulze Darup, Hrsg.: Projektbericht Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg. Zusammenstellung der Ergebnisse der Wissenschaftlichen Begleitforschung durch das Passivhaus Institut Darmstadt, FIW München, AnBUS Fürth und Architekturbüro Schulze Darup, Nürnberg 2005

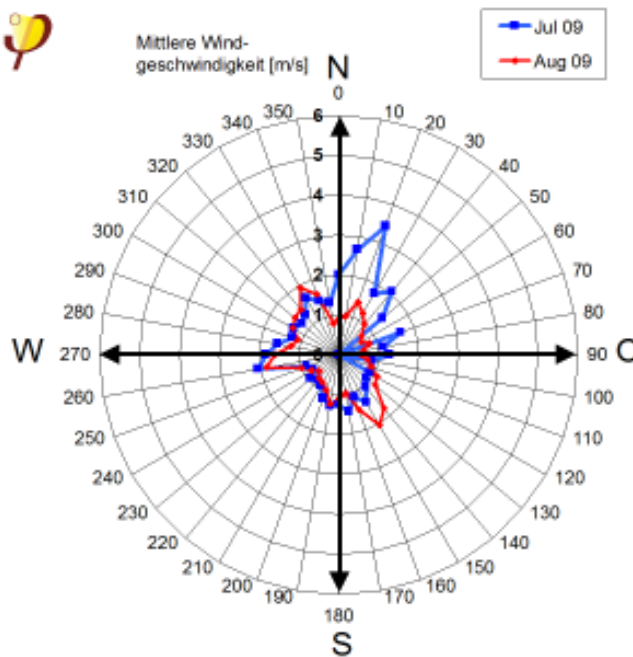
[Sedlbauer 2001] Sedlbauer, K., Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart 2001

[Weyand 2005] Weyand, N., Heinrich, H., Dahlem, K.-H., Modernisierung Brunckviertel – Ergebnisse zum "3-Liter-Haus" Beitrag im Tagungsband der 9. Passivhaustagung 2005, Ludwigshafen, April 2005

[Weyand 2007] N. Weyand, H. Heinrich, K.-H. Dahlem, 3-Liter-Haus im Bestand – Messkonzept und Messergebnisse von 3 Heizperioden, in: Bauphysik (2007) Heft 3, S. 213-220, Juni 2007

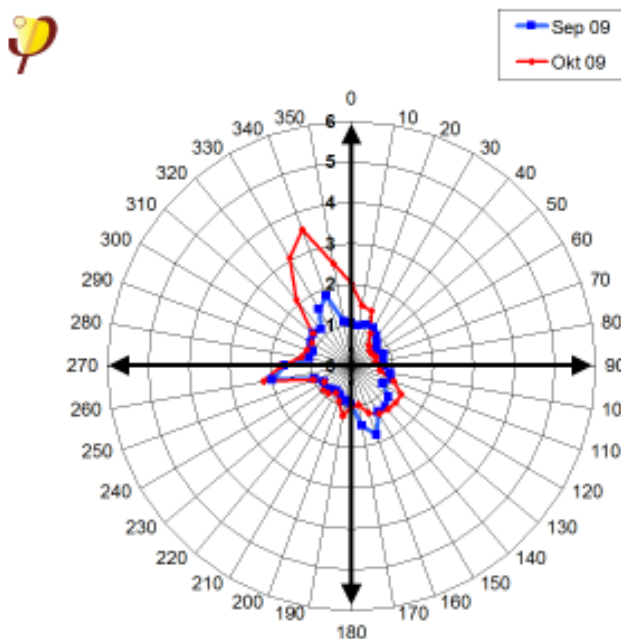
## 8 Anhang

### Monatsdiagramme der Windstärken und –richtungen der Station Schwedt/O.



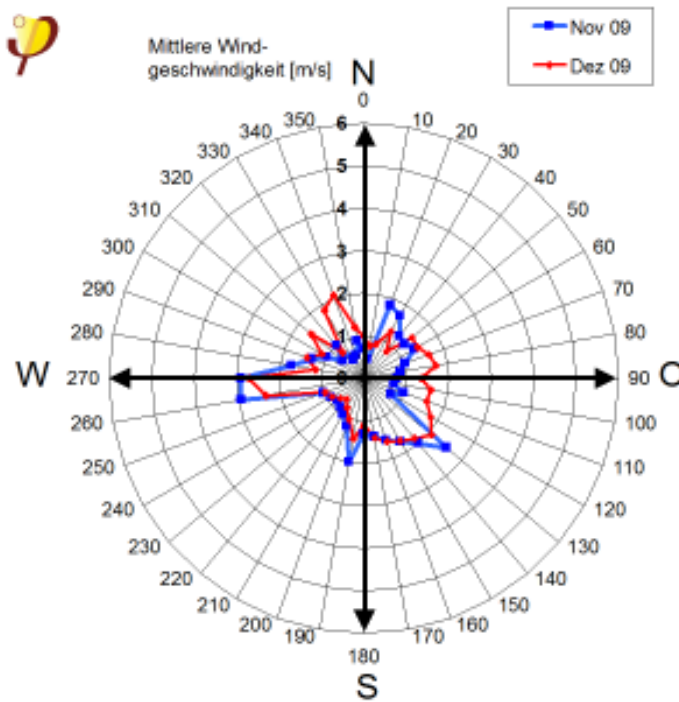
Windstärke und –richtung Schwedt Juli/August 2009

Abbildung 48



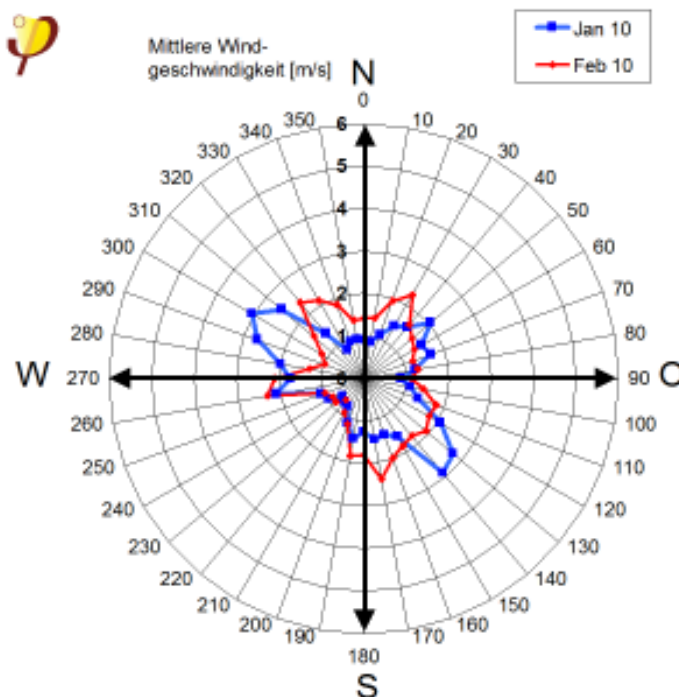
Windstärke und –richtung Schwedt September/Oktober 2009

Abbildung 49



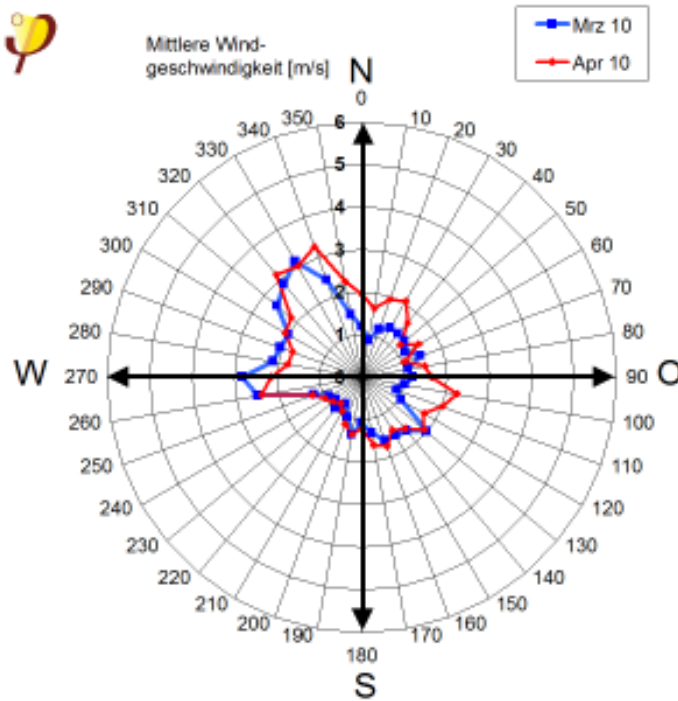
Windstärke und –richtung Schwedt November/Dezember 2009

Abbildung 50



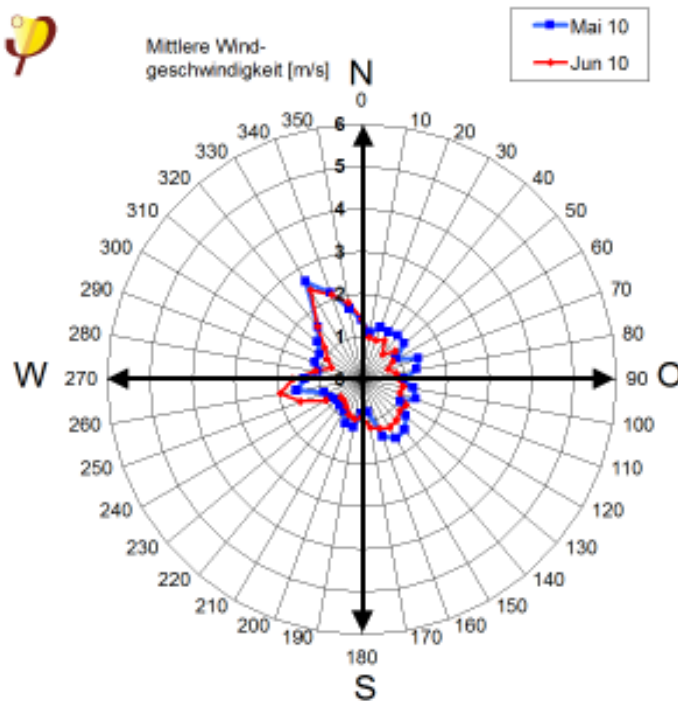
Windstärke und –richtung Schwedt Januar/Februar 2010

Abbildung 51



Windstärke und -richtung Schwedt März/April 2010

Abbildung 52



Windstärke und -richtung Schwedt Mai/Juni 2010

Abbildung 53



## U-Wert Berechnung Aussenwand Obergeschoss

2 Außenwand OG						
Beutel Nr. Beutel-Bezeichnung						
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]				innen R <sub>si</sub> :	0.13	
				außen R <sub>se</sub> :	0.04	
Teilfläche 1	λ(DP/mK)	Teilfläche 2 (optional)	λ(DP/mK)	Teilfläche 3 (optional)	λ(DP/mK)	Summe Breite Dicke [mm]
1. Innenputz, Leicht	0.230					15
2. Zellulose, gesprüht	0.052					80
3. Mauerwerk	0.800					420
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
						51.5 cm
				U-Wert:	0.435	W/(m <sup>2</sup> K)

U-Wert Berechnung und Materialkennwerte Obergeschoss

Abbildung 54