

# Innendämmung: Erste Ergebnisse eines Monitoring Projektes

Barbara Wehle  
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur / Berner Fachhochschule  
Biel, Schweiz





# Innendämmung: Erste Ergebnisse eines Monitoring Projektes

## 1. Einleitung

Rund ein Fünftel der Wohngebäude in der Schweiz wurde vor 1920 erbaut und kann damit als historisch bezeichnet werden. Da diese Gebäude größtenteils noch nicht umfassend energetisch saniert wurden, verursachen sie einen beträchtlichen Anteil des Heizenergiebedarfs.

Der Einsatz einer innenliegenden Wärmedämmung stellt bei vielen historischen Gebäuden die einzige denkmalgerechte Sanierungsmöglichkeit dar. Diese Sanierungsart weist aus bauphysikalischer Sicht jedoch hohe Schadensrisiken auf. Durch den Einbau einer innenliegenden Wärmedämmung ändern sich die Wärmeströme und Feuchtegehalte des Wandaufbaus. Diese Veränderungen werden in der Planungspraxis vermehrt mit numerischen Simulationen der Wärme- und Feuchteströme im Bauteil prognostiziert.

Im Rahmen des aktuell laufenden Forschungsprojektes «Monitoring des Feuchtehaushaltes innengedämmter Bauteile», gefördert vom Bundesamt für Energie, Schweiz werden in drei Gebäuden Langzeitmessungen der Temperatur- und Feuchteverläufe an Wandaufbauten mit innenliegender Wärmedämmung durchgeführt. Im Rahmen des Monitorings finden Untersuchungen an drei verschiedenen Innendämmsystemen statt. Zusätzlich zu den Messungen an den Wandaufbauten werden auch die Temperatur und relative Feuchte der Raumluft erfasst. Zudem kann für jeden Gebäudestandort auf Klimamessdaten einer nahegelegenen Wetterstation zugegriffen werden.

Durch eine detaillierte Auswertung der Messdaten können die derzeit gültigen Beurteilungskriterien hinsichtlich der Schadensfreiheit von Innendämmungen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Falls über einen langen Zeitraum hohe Feuchtegehalte auftreten, kann die Konstruktion geöffnet und hinsichtlich Schimmelpilzbildung oder anderen Feuchteschäden überprüft werden.

Neben der Messdatenerfassung an den Gebäuden werden verschiedene Messungen im Labor durchgeführt. So erfolgt z.B. anhand von Materialproben eine Bestimmung der Materialkennwerte, die für eine hygrothermische Bauteilsimulation bekannt sein müssen. Zudem werden über Messungen der elektrischen Widerstände sowie der Ausgleichsfeuchten im Klimaschrank Umrechnungsfunktionen ermittelt. Mit diesen können die insitu gemessenen Widerstände in Putz- und Mauerwerksschichten der Messobjekte in Materialfeuchten umgerechnet werden.

Anhand der Klimamessungen sowie der gemessenen Materialkenndaten können realistische numerische Bauteilsimulationen der untersuchten Innendämmsysteme durchgeführt werden. Dazu wird die Software WUFI®Pro [1] eingesetzt. Die gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe der Wandaufbauten dienen dabei zur Validierung der Simulationsmodelle. Stimmen Messwerte und Simulationsergebnisse hinreichend genau überein, kann der Einfluss verschiedener Eingabeparameter in der Simulation untersucht werden. So können bestehende Unsicherheiten bezüglich der Simulationseingaben minimiert werden.

In vorliegendem Tagungsbandbeitrag werden die untersuchten Messobjekte kurz beschrieben. Zudem werden anhand eines Objektes das Monitoringkonzept, die Materialmessungen im Labor sowie erste Ergebnisse der numerischen Simulationen vorgestellt.

## 2. Messobjekte

Die Auswahl der Messobjekte erfolgte in Absprache mit den am Forschungsprojekt beteiligten Wirtschaftspartnern Flumroc AG, Isofloc AG, Saint-Gobain ISOVER SA sowie pro clima schweiz GmbH. Pro Wirtschaftspartner wird ein Messobjekt mit Messtechnik ausgestattet. So können im Rahmen des Forschungsprojektes drei unterschiedliche Innendämmsysteme untersucht werden. Gemäß ihren Standorten werden die Messobjekte nachfolgend als «Aarwangen», «Brüttelen» und «Bütschwil» bezeichnet.

Es wurde darauf geachtet, dass die Sanierung der ausgewählten Objekte mit Innendämmsystemen nach heutigem Stand der Technik und typischen Dämmstoffdicken erfolgte. Sonderlösungen beziehungsweise kritische Dämmstoffdicken wurden nicht in Betracht gezogen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes eine hohe Relevanz in Bezug auf den Schweizer Gebäudebestand sowie die heutige Sanierungstätigkeit aufweisen.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Eigenschaften der Messobjekte aufgeführt. Soweit dies möglich war, wurden unter Denkmalschutz stehende Gebäude für das Forschungsprojekt ausgewählt. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der sanierten Bauteile liegen im Bereich von 0.17 bis 0.19 W/(m<sup>2</sup>K). Damit sind die in der Schweiz gültigen Energievorschriften für Umbauten zum Zeitpunkt der Sanierungen eingehalten.

Tabelle 1: Beschreibung der Messobjekte.

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
<b>Bezeichnung</b>	«Aarwangen»	«Brüttelen»	«Bütschwil»
<b>Wirtschaftspartner</b>	Flumroc AG; pro clima schweiz GmbH	Saint-Gobain Isover AG	Isofloc AG
<b>Baujahr</b>	ca. 1908	ca. 1900	ca. 1958
<b>Nutzung</b>	Wohnnutzung	Wohnnutzung	Werkstatt
<b>Bewertung Denkmalpflege</b>	erhaltenswert, K-Objekt	erhaltenswert	-
<b>Höhenlage</b>	ca. 437 m ü.M.	449 m ü.M.	610 m ü.M.
<b>Mauerwerk</b>	Lochziegel	Bruchstein	Backstein (Vollziegel)
<b>Innendämmung</b>	Steinwolle 12 cm (Flumroc Dämmplatte 1 und 3), Dampfbremse (pro clima Intello)	Glaswolle, 17 cm (Isover PB M 035), Dampfbremse (Vario Xtra)	Zellulosefasern, 14 cm (Isofloc LM)
<b>U-Wert saniertes Bauteil</b>	0.18 W/(m <sup>2</sup> K)	0.19 W/(m <sup>2</sup> K)	0.17 W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Start Monitoring</b>	September 2014	Juli 2014	Mai 2015

Stellvertretend für die anderen Objekte werden das Monitoringkonzept, die Materialmessungen im Labor sowie erste Ergebnisse der numerischen Simulationen in vorliegendem Tagungsbandbeitrag hauptsächlich anhand des Gebäudes in Brüttelen beschrieben. Aus diesem Grund wird das Objekt nachfolgend detaillierter vorgestellt.

### 2.1. Details Objekt Brüttelen

Das Objekt Brüttelen befindet sich geografisch zwischen den Gemeinden Brüttelen und Ins im Kanton Bern. Das Gebäude wird als Wohnhaus genutzt und ist Teil eines Ensembles von Gebäuden, die alle zu einem Gehöft gehören.

In unmittelbarer Nähe des Gehöfts befindet sich ein Steinbruch. Der Bruchstein der Außenwand wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit aus diesem Steinbruch entnommen.

Ende 2014 wurde das Wohngebäude energetisch saniert. Dabei wurde auch eine innenliegende Wärmedämmung eingebaut. Einige Jahre zuvor wurde der Außenputz erneuert.

In Tabelle 2 ist eine detaillierte Beschreibung des sanierten Wandaufbaus dargestellt.

Tabelle 2: Beschreibung Wandaufbau des Objektes Brüttelen.

Materialschicht	Dicke	Material
Aussenputz	ca. 2 cm	Zementputz mit Silikonharzanstrich; ca. 2000 erneuert
Aussenwand	ca. 50 cm	Bruchstein (Muschelsandstein)
Wärmedämmung	4 cm	Isover PB M 035, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Wärmedämmung	10 cm	Installationsebene mit Isover PB M 035 und feuchteadaptiver Dampfsperre Vario Xtra, $s_d$ -Wert 0.3 bis 20 m
Wärmedämmung	3 cm	Installationsebene mit Isover PB M 035
Verkleidung Innen	1.5 cm	Gipsfaser-Platte (Fermacell)

Abbildung 1 zeigt eine Ansicht des Objektes Brüttelen. In Abbildung 2 sind die Einbauorte der Sensoren für das Monitoring dargestellt. Eine Messstelle befindet sich auf der Nordwestwand und die zweite auf der Südwestwand.



Abbildung 1: Ansicht Südwestfassade des Objekts Brüttelen.



Abbildung 2: Einbauorte der Sensoren für Monitoring; Blaue Messstelle: Nordwestwand; Rote Messstelle: Südwestwand.

### 3. Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept im Rahmen des Forschungsprojektes beinhaltet Messungen an den innendämmten Bauteilen sowie des umgebenden Raum- und Aussenklimas. Die Messungen der Temperatur- und Feuchteverläufe der Wandaufbauten sowie des Raumklimas erfolgen mit Messtechnik der Firma Scantronik. Das Aussenklima wird über Wetterstationen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie bezogen.

Nachfolgend wird der Messaufbau des Objektes Brüttelen näher beschrieben.

#### 3.1. Messungen am Bauteil

Abbildung 2 zeigt die Einbauorte der Sensoren am Objekt Brüttelen. Der als Wohnküche genutzte Raum, in dem die Sensoren eingebaut sind, verfügt über Außenwände mit Nordwest- und Südwestausrichtung. Während die nach Südwesten ausgerichtete Wand der Witterung ausgesetzt ist, kann die Nordwestwand aufgrund des großen Dachvorstands als regen- und sonnengeschützt betrachtet werden.

Abbildung 3 zeigt die Positionen der Sensoren in den Wandquerschnitten. An mehreren Stellen der Wandaufbauten wird stündlich die Temperatur (T) in °C, die relative Feuchte (rF) in % sowie die Materialfeuchte (MF) als elektrischer Widerstand in Ohm aufgezeichnet.

Die Messung der Temperatur in den Bauteilaufbauten erfolgt mittels Sensoren der Bauart Heißleiter, also über temperaturabhängige Widerstandsbaulemente. Zudem kommen Thermo-Hygro-Sensoren zur Messung der Temperatur und relativen Feuchte an einer Messstelle zum Einsatz.

Zusätzlich zu den Messstellen der relativen Feuchte erfolgt die Bestimmung der Materialfeuchte über Messungen des elektrischen Widerstandes. Dazu werden je Messstelle zwei Elektroden mit einem Abstand von 30 mm im rechten Winkel zur Bauteiloberfläche im Material positioniert. Die Elektroden bestehen aus nichtrostendem Stahl. Ihr Schaft ist teflonisoliert, um die Materialfeuchte einer möglichst dünnen Schicht zu messen.

Die Länge der Elektroden bestimmt, in welcher Tiefe die Materialfeuchte gemessen wird. Für das Objekt Brüttelen wurde die maximale Sondenlänge von 70 mm verwendet. Im Aussenputz werden als Elektrodenpaar zwei Edelstahlschrauben mit einer Länge von 15 mm zur Widerstandsmessung verwendet.

Im Mauerwerk erfolgt die Messung der Materialfeuchte über den elektrischen Widerstand des Materials zwischen den beiden Spitzen eines Elektrodenpaares. Die Messung der Materialfeuchte im Aussenputz gibt den Mittelwert des elektrischen Widerstandes über die Putzdicke wieder.

Der Messaufbau beinhaltet neben Datenloggern zu Datenspeicherung auch Geräte zur Datenfernübertragung mit GPRS-Modem. Über diese werden die gesammelten Messdaten in regelmäßigen Abständen per E-Mail übertragen.

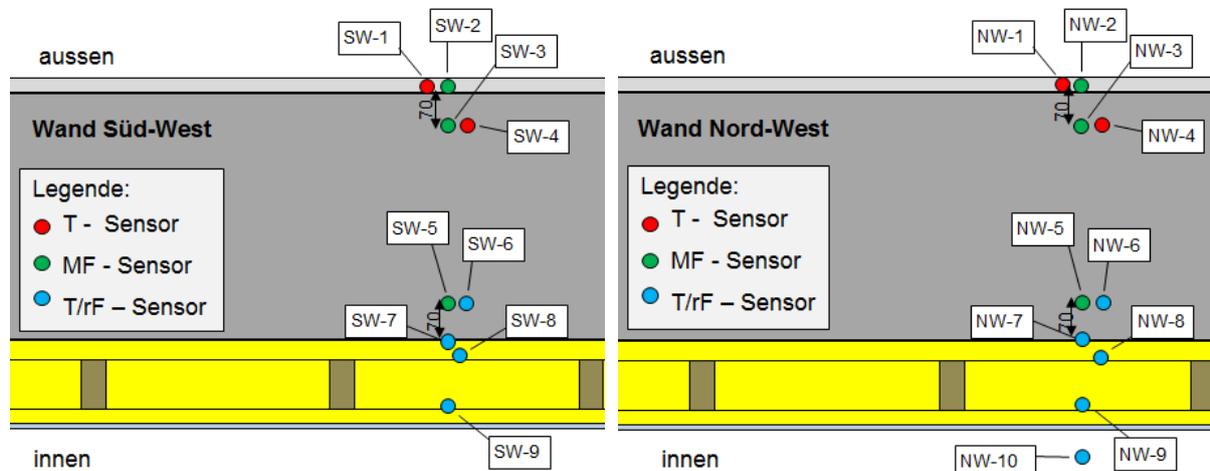


Abbildung 3: Wandquerschnitte der Südwestwand (SW) links und der Nordwestwand (NW) rechts mit Sensoranordnung des Objektes Brüttelen. «T» bezeichnet Sensoren zur Aufzeichnung der Temperatur (rot), «MF» Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung (grün) und «T/rF» Sensoren zur Messung der Temperatur sowie der relativen Feuchte (blau).

### 3.2. Messungen des Raum- und Aussenklimas

Um die hygrothermische Bauteilsimulationen anhand der Bauteilmesswerte validieren zu können, muss auch das umgebende Raum- und Aussenklima des gleichen Messzeitraumes miterfasst werden. Neben den Messungen an den Bauteilen werden daher auch die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Raumlufttemperatur der Wohnküche mit einem von der Decke abgehängten Sensor stündlich aufgezeichnet. Diese Messstelle ist im rechten Bild der Abbildung 3 mit «NW-10» bezeichnet.

Für das Aussenklima am Standort wird auf das Datenportal «IDAweb»[2] des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie zurückgegriffen, über welches verschiedene Wetterstationen abgerufen werden können. Die Kriterien bei der Auswahl einer geeigneten Wetterstation sind eine kurze Entfernung zum Messobjekt, eine ähnliche Höhenlage sowie eine vergleichbare geographische Situation.

Für das Objekt Brüttelen wird die 12 km entfernte und auf gleicher Höhe gelegene Wetterstation Cressier verwendet. Folgende Aussenklimamesswerte werden von dieser stündlich aufgezeichnet: Luftfeuchte, Außentemperatur, Normalregen, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Aus den Globalstrahlungsdaten werden mit Hilfe des Perez-Modells [3] die Anteile der Diffus- und Direktstrahlung ermittelt. Somit stehen alle für eine hygrothermische Bauteilsimulation benötigten Aussenklimadaten zur Verfügung.

## 4. Materialmessungen im Labor

Die insitu gemessenen elektrischen Widerstände müssen durch Kalibrierkurven in einen Wassergehalt des Materials umgerechnet werden. Dazu werden Messungen des elektrischen Widerstandes sowie und der dazugehörigen Ausgleichsfeuchte an Probekörpern im Labor durchgeführt. Aus diesen lassen sich Widerstands- sowie Sorptionsisothermen zur Umrechnung in einen Wassergehalt bestimmen.

Zudem werden an den Probekörpern eine Reihe weiterer Materialmessungen zur Bestimmung der für hygrothermische Bauteilsimulationen notwendigen Materialkennwerte durchgeführt.

Nachfolgend werden die Materialmessungen an Probekörpern des Objektes Brüttelen näher beschrieben. In Brüttelen waren Kernbohrungen seitens der Eigentümer nicht erwünscht. Der Bruchstein des Mauerwerks stammt aus einem Steinbruch in unmittelbarer Nähe zum Gehöft. Die Prüfkörper der Labormessungen wurden diesem entnommen. Der Außenputz wurde ca. im Jahr 2000 erneuert. Mit Unterstützung der ausführenden Firma wurden Aufbau und Materialien des Putzes bestimmt. So konnten die Außenputzproben nachgebaut werden. Als Putzträger wurden Bohrkerne des entnommenen Natursteines verwendet.

### 4.1. Bestimmung Materialfeuchten und elektrische Widerstände

Bei der Messung der Materialfeuchte mittels Widerstandsmessung für Putz und Mauerwerk wird bei den Insitu-Messungen stündlich ein elektrischer Widerstand gemessen. Für die vorliegenden Baustoffe steht jedoch kein Tabellenwerk zur Verfügung, das einen Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Feuchtegehalt angibt. Daher ist es erforderlich, Messungen zur Ableitung einer Umrechnungsfunktion durchzuführen.

Dazu werden zwei Putzproben und zwei Steinproben mit Messtechnik zur Messung des elektrischen Widerstandes versehen. Die Anordnung der Messensoren, wie z.B. Abstand und Art der Sonden, entspricht dabei dem Messaufbau am Objekt Brüttelen.

Die mit Messtechnik versehenen Materialproben werden in einem Klimaschrank stufenweise veränderten relativen Feuchten ausgesetzt. Ausgehend von 30% rF werden die Feuchtestufen in Zehnerschritten bis 90% rF erhöht. Die Temperatur wird dabei konstant auf 30°C gehalten. Nach Erreichen der Ausgleichfeuchte der Proben je Feuchtestufe wird der Widerstand in den einzelnen Schichten gemessen. Diese Messwertpaare werden für die Erstellung der Widerstands- isothermen verwendet.

Parallel zu den Widerstandsmessungen muss die Materialfeuchte an separaten Probenstücken erfasst werden, um die dazugehörige Sorptionsisotherme zu ermitteln. Dazu wird die Masse des Prüfkörpers bestimmt, nachdem auf der jeweiligen Feuchtestufe die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist. Mit der Masse und dem Volumen wird die Dichte des Prüfkörpers bei der jeweiligen relativen Luftfeuchte berechnet.

Sind die Rohdichten der Prüfkörper der einzelnen Feuchtestufen ermittelt, kann durch die Subtraktion der Darrdichte der Wassergehalt des Prüfkörpers berechnet werden. Der Wassergehalt wird für die Bildung der Sorptionsisotherme, auch Feuchtespeicherfunktion genannt, verwendet. Die Sorptionsisothermen ermöglichen die Umrechnung von der relativen Luftfeuchte zum Wassergehalt.

Aufgrund des Hystereseffekts müssten theoretisch die Widerstände und Materialfeuchten für jeden Prüfkörper durch Adsorption und Desorption ermittelt werden. Aus Zeitgründen wurden die Messungen jedoch nur bei zunehmender relativer Feuchte, sprich Adsorption, gemessen.

### 4.2. Bestimmung Isotherme

Um aus den Wertepaaren des elektrischen Widerstands und des zugehörigen Wassergehalts die Widerstands- isotherme ableiten zu können, muss durch eine statistische Auswertung eine Ausgleichsfunktion an die Messwerte angepasst werden.

So ist es möglich, auf Basis der gemessenen Widerstände der Materialien im Labor eine Umrechnungsfunktion zu generieren, die den Verlauf des ohmschen Widerstandes in Abhängigkeit der Materialfeuchte, respektive der relativen Feuchte beschreibt.

Die Regressionsfunktion wird nach der Methode der kleinsten Summe der quadratischen Fehler erstellt. Diese besteht darin, die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen (Residuen) der Ausgleichskurve von den Messpunkten minimiert wird.

Hierfür muss eine zum Datenverlauf passende Funktionenklasse ausgewählt werden. Da der ohmsche Widerstand mit der Zunahme der relativen Luftfeuchte scheinbar exponentiell abnimmt, wurde folgende Exponentialfunktion gewählt.

$$R_{M_k}(\varphi) = a_1 * e^{(a_2 * \varphi)} + a_3$$

Mit:

$R$  = Widerstand in  $\Omega$ ;  $\varphi$  = relative Feuchte, einheitslos;  $a_{1...3}$  = Koeffizienten;  $M_k$  = Material

Die Koeffizienten  $a_{1...3}$  werden so bestimmt, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen,  $e$ , der gemessenen Widerstände,  $R_i$  in  $\Omega$ , zu den Funktionswerten  $R_{M_k}(\varphi)$  des entsprechenden Materials,  $M_k$ , minimiert wird.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die ermittelten Widerstands Isothermen der Steinproben des Objektes Brüttelen. Bei den niedrigen Feuchtestufen ändern sich die Differenzen der Messkurven aufgrund des exponentiellen Verlaufs der Umrechnungsfunktion ebenfalls exponentiell. Dadurch lassen sich die hohen Abweichungen der Widerstands Isothermen der untersuchten Prüfkörper bei niedrigen relativen Feuchten bis 50 % erklären.

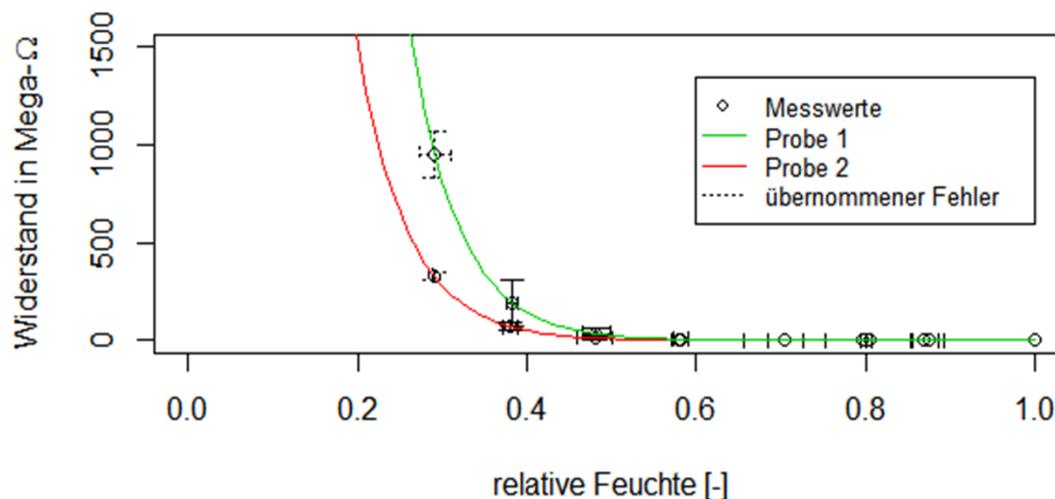


Abbildung 4: Widerstands Isothermen der Steinproben des Objektes Brüttelen.

Die Bestimmung der Sorptions Isotherme erfolgt nach dem gleichen Vorgehen mittels der Auswahl einer geeigneten Funktionsklasse und der Ableitung von Regressionsfunktionen.

### 4.3. Bestimmung weitere Materialkennwerte

Für die Durchführung hygrothermischer Simulationen ist die Eingabe bestimmter Materialkennwerte erforderlich. Um die Simulationen so genau wie möglich der Realität anpassen zu können, wurden den untersuchten Objekten soweit möglich Prüfkörper des Mauerwerks sowie Außenputzes entnommen.

Am Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP wurden folgende Materialkennwerte der Prüfkörper bestimmt: Rohdichte, Porosität, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, hygroskopische Sorptionseigenschaften, Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Weiterleiten, Wasseraufnahmekoeffizient sowie freie Wassersättigung. Aus diesen können Materialdatensätze für die hygrothermische Simulation erstellt werden.

Für das Objekt Brüttelen wurden oben genannte Materialkennwerte an den entnommenen Steinproben am Fraunhofer IBP gemessen. An den Putzproben wurden Messungen des Wasseraufnahmekoeffizient in den Laboren der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau BFH AHB durchgeführt. Da die Wasseraufnahmefähigkeit des Außenputzes ein entscheidender Einflussfaktor auf den Feuchteverlauf innengedämmter Bauteile hat, wurden zudem Insitu-Messungen des Wasseraufnahmekoeffizient des Außenputzes am Gebäude durchgeführt. Dazu kamen die in [4] beschriebenen Insitu-Messmethoden zum Einsatz.

## 5. Numerische Simulation

Die Simulation der eindimensionalen Wärme- und Feuchteströme der Bauteilaufbauten erfolgt mit der Software WUFI®Pro. Nachfolgend werden die Randbedingungen und Eingaben der Simulation der Bauteilaufbauten des Objektes Brüttelen detaillierter beschrieben.

Als Klimarandbedingungen werden für das Objekt Brüttelen die in Abschnitt 3.2 genannten Messwerte des Raum- und Aussenklimas verwendet.

Die Eingabe der Materialschichten erfolgt gemäß dem tatsächlichen Wandaufbau (vgl. Tabelle 2). Aus den gemessenen Materialkennwerten der Steinproben wird ein neuer Materialdatensatz zur Abbildung des Bruchsteines generiert. Bruchsteinmauerwerk weist meist einen hohen Anteil an Mörtelfugen auf. Über diese wird Feuchte in der Regel schneller transportiert als über den Naturstein. Es wurden verschiedene Vorgehensweisen getestet, den Mörtelanteil in der Simulation zu berücksichtigen. Beispielsweise wurde an verschiedenen Stellen des Natursteinmauerwerkes Mörtelschichten unterschiedlicher Dicken eingefügt. Die beste Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Feuchteverläufe ergibt sich jedoch bei einer Anpassung des Materialdatensatzes des Steines. Diese erfolgt über eine Änderung der Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Weiterleiten, wodurch der Feuchtetransport im Mauerwerk beschleunigt wird.

Für den Aussenputz wird ein Zementputz aus der WUFI-Datenbank gewählt. Der Wasseraufnahmekoeffizient des Außenputzes wird gemäß den Labormessungen der Wasseraufnahme an den Putzproben angepasst. Zur Abbildung der Innendämmung in der Simulation wurde der Datensatz «Isover Uniroll 035» verwendet, welcher die gleichen Materialkennwerte wie das am Gebäude verbaute Produkt aufweist. Feuchtevariable Dampfbremse sowie Gipsfaserplatte wurden ebenfalls der WUFI-Materialdatenbank entnommen.

Passend zur Sensoranordnung der zu untersuchenden Außenwände (vgl. Abbildung 3) werden in der Simulation sogenannte Monitorpositionen gesetzt. Das Simulationsprogramm WUFI®Pro ermöglicht an diesen Monitorpositionen die Ausgabe verschiedener Messgrößen, wie der Temperatur und relativen Luftfeuchte, welche für den Vergleich mit den Insitu-Messungen herangezogen werden.

## 6. Vergleich Insitu-Messungen und numerische Simulation

Nachfolgend werden erste Simulations- und Messergebnisse des Objektes Brüttelen vorgestellt. Den Simulationen liegen die in vorhergehendem Abschnitt genannten Randbedingungen und Eingaben zugrunde. Ausgewertet werden die Verläufe der relativen Feuchte an den Messstellen «SW-7» und «NW-7», also der Grenzschicht zwischen Innendämmung und bestehendem Mauerwerk des Zeitraumes 15.10.2014 bis 31.01.2017.

Abbildung 5 und Abbildung 7 zeigen zum einen die gemessenen (blau) und simulierten Verläufe (rot) der relativen Feuchte an den Messstellen «SW-7» und «NW-7». Zum anderen sind die relativen Feuchten der Außen- (grau) und Innenluft (schwarz) aufgeführt. Für eine übersichtlichere Darstellung sind diese geglättet dargestellt.

Abbildung 6 und Abbildung 8 stellen die Differenz zwischen den Temperaturverläufen der Insitu-Messungen und der Simulation dar. Dazu wird jeder vor Ort gemessene Temperaturwert vom simulierten Wert des gleichen Zeitschrittes abgezogen und als Balken dargestellt. Parallel dazu ist die totale Differenz über die ganze Periode und die gemittelte

Differenz über alle Messwerte ersichtlich, die sich aus der Summe aller negativen und positiven Differenzen ergeben. Ist die totale Differenz bzw. gemittelte Differenz positiv, so bedeutet dies, dass die simulierte Temperatur im Allgemeinen höher ausgefallen ist als die insitu gemessene Temperatur.

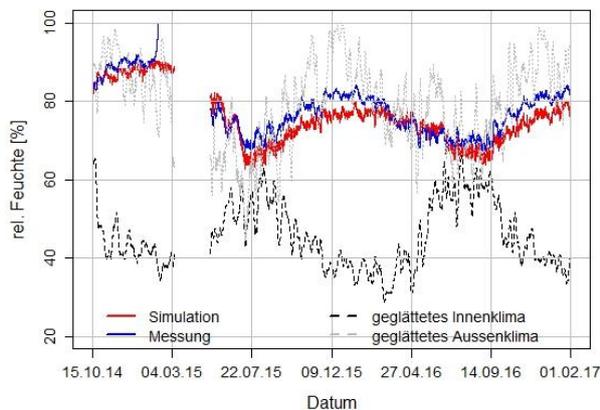


Abbildung 5: Gemessener und simulierter Feuchteverlauf der Südwestwestwand an der Messstelle SW-7 in Brüttelen im Messzeitraum vom 15.10.2014 bis 31.01.2017.

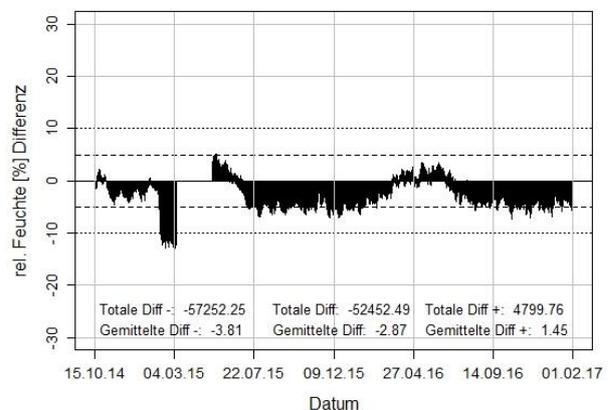


Abbildung 6: Differenz zwischen gemessener und simulierter relativer Feuchte der Südwestwestwand an der Messstelle SW-7 in Brüttelen (Messzeitraum 15.10.2014 bis 31.01.2017).

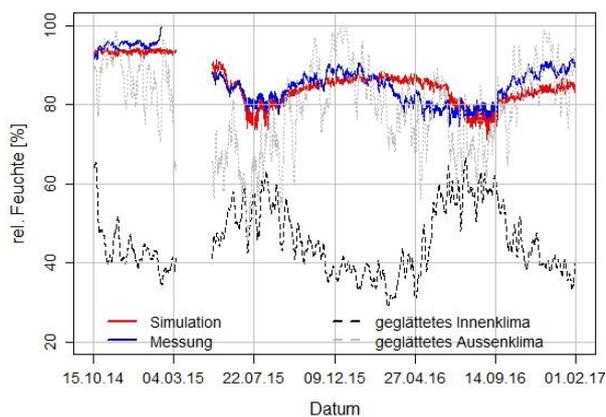


Abbildung 7: Gemessener und simulierter Feuchteverlauf der Nordwestwestwand an der Messstelle NW-7 in Brüttelen im Messzeitraum vom 15.10.2014 bis 31.01.2017.

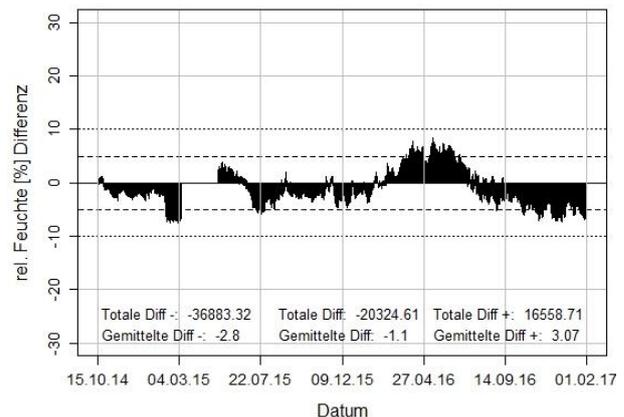


Abbildung 8: Differenz zwischen gemessener und simulierter relativer Feuchte der Nordwestwestwand an der Messstelle NW-7 in Brüttelen (Messzeitraum 15.10.2014 bis 31.01.2017).

Die Verläufe der simulierten und gemessenen relativen Feuchten stimmen im Großen und Ganzen gut überein. So weichen Simulation und Messung in einem Großteil des untersuchten Zeitraumes nicht mehr als 5 % voneinander ab (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 8 gestrichelte 5 %-Linien).

Aufgrund eines Batterieausfalls zeichneten einige der Sensoren am Objekt Brüttelen von Anfang März 2014 bis Anfang Mai 2014 keine Messwerte auf. Wenige Tage vor dem Ausfall der Messtechnik erfassten beide Sensoren der Messstellen «SW-7» und «NW-7» relative Feuchten im Bereich von 100 %. In den Simulationen treten diese hohen

Feuchten jedoch nicht auf. Nach dem Batterietausch liegen die gemessenen Feuchten auf einem niedrigeren Niveau. Simulationen und Messungen stimmen wieder gut überein.

In den ersten Monaten des Untersuchungszeitraumes weisen beide Messstellen hohe relative Feuchten größer 90 % auf. Ursache hierfür können erhöhte Einbaufeuchten der Materialien sein. Auf der Nordwestwand bewegt sich die simulierte und gemessene relative Feuchte im weiteren Verlauf auf einem hohen Niveau, meist oberhalb von 80 %. Der Medianwert des gesamten Untersuchungszeitraumes der gemessenen relativen Feuchte liegt an der Nordwestwand bei 86 %. An der Südwestwand pendelt sich die relative Feuchte auf einem niedrigeren Niveau ein, erreicht in den Wintermonaten jedoch auch

Werte oberhalb von 80 % relativer Feuchte. Der Medianwert der gemessenen relativen Feuchte des gesamten Untersuchungszeitraums liegt an der Südwestwand bei 78 %. Ursache für das niedrigere Feuchteniveau der Südwestwand kann die höhere solare Einstrahlung sein. Auf Grund der hohen Feuchten oberhalb von 80 % ist Schimmelpilzbildung an den Grenzschichten zwischen Innendämmsystem und Bestandswand nicht auszuschließen. Eine Auswertung der relativen Feuchten der Messstellen «SW-8» und «NW-8» zeigt, dass sich die gemessenen relative Feuchten an beiden Wandaufbauten deutlich unterhalb von 80 % einpendeln. Die hohen Feuchten beschränken sich demnach auf die Grenzschichten und führen nicht zu einem Verlust der Dämmwirkung.

Die Messstellen des elektrischen Widerstandes «NW-5» und «SW-5» werden ebenfalls ausgewertet und mit Hilfe der Isothermen in relative Feuchten umgerechnet. Ein Vergleich der simulierten relativen Feuchte an den dazugehörigen Monitorpositionen zeigt jedoch große Abweichungen von Messung und Simulation. Diese fallen bei den Messstellen der relativen Feuchte «NW-6» und «SW-6» deutlich geringer aus. Der Einsatz von Thermo-Hygro-Sensoren scheint demnach besser geeignet zu sein zur Erfassung des Feuchteverlaufes eines Natursteinmauerwerks als die Bestimmung der Materialfeuchte über Messungen des elektrischen Widerstandes.

## 7. Ausblick und Danksagung

Das Forschungsprojekt wird voraussichtlich Ende März 2017 abgeschlossen sein. Sofern die Eigentümer einverstanden sind, werden die Messungen an den Gebäuden noch einige Jahre fortgesetzt. Soweit dies möglich war, wurden Revisionsöffnungen in den Wandaufbauten vorgesehen. Diese sollen einen Ausbau der Sensoren ermöglichen, um diese nach Abschluss der Messungen nachkalibrieren zu können.

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Energie, Schweiz für die Förderung des Forschungsprojektes, bei den Wirtschaftspartnern für die Beteiligung sowie bei den Gebäudeeigentümern für die Erlaubnis zur Durchführung der Messungen.

## 8. Quellenangaben

- [1] Software WUFI®Pro, Version 5.3, DB 24.78.0.1
- [2] MeteoSchweiz, «Datenportal IDAweb» Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, [Online]. Available: <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do> [Zugriff am 22.02.2017].
- [3] R. Perez, P. Ineichen, R. Seal, A. Zalenka und E. Maxwell, «Dynamic global-to-direct irradiance conversion models» *ASHRAE Transactions*, Bd. vol. 98, Nr. no. 1, pp. 354-369, 1992.
- [4] C. Geyer, B. Wehle, F. Gariglio, «Wasseraufnahmekoeffizienten historischer Aussenputze», Berner Fachhochschule Architektur Holz und Bau, Forschungsbericht, 2015