

**Inhalt:** **Abschlussbericht**

**Projekt:** **Co<sub>2</sub>olBricks**  
**Passierzettel Hamburg**  
**Leadpartner Denkmalschutzamt Hamburg**  
**im Rahmen des Work Package 4**  
**WP 4 Leader: Dipl.-Ing.Arch. Albert Schett**

**Auftraggeber:** Freie und Hansestadt Hamburg  
**Kulturbehörde Denkmalschutzamt**  
**Große Bleichen 30**  
**20354 Hamburg**  
  
Telefon: +49 (0) 40 42824-720 /-729  
Fax: +49 (0) 40 427310008

**Auftragnehmer:** **GWT- TUD GmbH**  
**Blasewitzer Straße 43**  
**01307 Dresden**  
  
Telefon: +49 (0) 351 463-33043  
Fax: +49 (0) 351 463-32627

**Stand/Datum:** 27. May 2015

.....  
Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
Ressortleiter bei der GWT-TUD GmbH und  
Leiter des Forschungs- und Entwicklungslabors  
Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden

## Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Ausgangslage / Motivation   | 5  |
| 1.1   | Bezug der Untersuchungen zum EU-Projekt Co2olBricks                     | 5  |
| 1.2   | Einordnung in laufende nationale und internationale F&E-Aktivitäten     | 5  |
| 1.3   | Sanierungsgegenstand und –potenzial in Hamburg                          | 6  |
| 2     | Untersuchungsgebiet   | 7  |
| 2.1   | Allgemeine Darstellung  | 7  |
| 2.2   | Auswahl der Wohneinheiten für das Monitoring                            | 8  |
| 3     | Grundlegende bauphysikalische Zusammenhänge                             | 10 |
| 4     | Untersuchungsdesign   | 11 |
| 4.1   | Vergleichsfälle   | 11 |
| 4.2   | Hardwareausstattung der Messstellen                                     | 12 |
| 4.3   | Lage der Messstellen im Gebäude / in den WE                             | 13 |
| 4.4   | Beschreibung der erfassten Daten  | 13 |
| 4.5   | Beschreibung der abgeleiteten Daten                                     | 14 |
| 4.6   | Ergänzung der Datenbasis durch Messdaten des DWD                        | 14 |
| 4.7   | Aufbereitung der Daten als Eingangsgrößen für die Simulationsrechnungen | 14 |
| 5     | Messergebnisse  | 16 |
| 5.1   | Erfasste Rohdaten / Beurteilung der Rohdatenqualität                    | 16 |
| 5.2   | Klimarandbedingungen (Außenluft und Raumluft)                           | 16 |
| 5.3   | Oberflächentemperaturen der Konstruktion (außen und innen)              | 19 |
| 5.4   | Hygrothermische Zustände innerhalb der Konstruktion                     | 21 |
| 5.5   | Darstellung abgeleiteter Größen   | 24 |
| 5.6   | Ergänzende Daten des DWD  | 29 |
| 6     | Modellbildung und Simulation  | 34 |
| 6.1   | Beschreibung der Konstruktion und Umsetzung im Modell                   | 34 |
| 6.1.1 | Geometrische Eigenschaften / Wandaufbau                                 | 34 |
| 6.1.2 | Materialdaten   | 39 |
| 6.2   | Darstellung der Simulationsergebnisse                                   | 41 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.2.1 | Modellkalibrierung zur Qualifikation der Simulationsergebnisse   | 41 |
| 6.2.2 | Betrachtung der U-Werte der verschiedenen Konstruktionen   | 45 |
| 6.2.3 | Vergleichsrechnungen zur Bewertung verschiedener Sanierungsoptionen  | 56 |
| 6.2.4 | Vergleich der Transmissionswärmeverluste über die Außenwandkonstruktion bei verschiedenen Sanierungsoptionen | 63 |
| 6.2.5 | Vergleich der Lüftungswärmeverluste für unterschiedliche Raumlufttemperaturen und Luftwechselraten           | 70 |
| 6.3   | Integrierter Vergleich verschiedener Systemansätze   | 72 |
| 7     | Schlussfolgerungen   | 75 |
| 7.1   | Vorzüge und Nachteile der betrachteten Grundsystemansätze  | 75 |
| 7.1.1 | Konvektiv beheizte Systeme   | 75 |
| 7.1.2 | Systeme mit Wandflächentemperierung  | 76 |
| 7.2   | Ableitung einer Hybridlösung   | 78 |
| 8     | Glossar  | 85 |
| 8.1   | Absolute Luftfeuchtigkeit  | 85 |
| 8.2   | Ausgleichsfeuchte $w_{80}$ und Sättigungsfeuchtegehalt $w_{sat}$   | 85 |
| 8.3   | Dampfdiffusion   | 85 |
| 8.4   | Heizwärmebedarf (Qh)   | 85 |
| 8.5   | Konvektion   | 85 |
| 8.6   | Lüftungswärmeverlust   | 85 |
| 8.7   | Relative Luftfeuchtigkeit  | 86 |
| 8.8   | Rohdichte  | 86 |
| 8.9   | Spezifische Wärmekapazität c   | 86 |
| 8.10  | Strömung   | 86 |
| 8.11  | Taupunkttemperatur   | 86 |
| 8.12  | Transmissionswärme   | 86 |
| 8.13  | Wärmebrücke  | 86 |
| 8.14  | Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)  | 87 |
| 8.15  | Wärmedurchgangswiderstand R  | 87 |
| 8.16  | Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Wert)  | 87 |
| 8.17  | Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG)  | 87 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 8.18 | Wärmeleitfähigkeitsstufe (WLS)              | 87 |
| 8.19 | Wärmespeicherfähigkeit $\rho * c$           | 88 |
| 8.20 | Wasseraufnahmekoeffizient $A_w$             | 88 |
| 8.21 | Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu$ | 88 |



## 1 Ausgangslage / Motivation

### 1.1 Bezug der Untersuchungen zum EU-Projekt Co<sub>2</sub>olBricks

Das Denkmalschutzamt der Freien und Hansestadt Hamburg koordiniert als Lead-Partner im Rahmen des EU INTERREG IVB Ostseeprogramms (Baltic Sea Region Programme 2007 – 2013) die gemeinsamen Forschungsaktivitäten von 18 Partnern (Behörden, Universitäten, Stiftungen und Verbände) aus neun Ostseeanrainerstaaten. Das Projekt wurde 2011 gestartet und soll zum Ende 2013 abgeschlossen werden. Ziel ist die Erprobung und Dokumentation alternativer technischer Lösungen zur energetischen Ertüchtigung bestehender Bauwerke unter besonderer Berücksichtigung baukultureller Belange – insbesondere im Hinblick auf die Erhaltung der äußeren Fassade und damit verbunden des gewohnten Stadtbildes.

### 1.2 Einordnung in laufende nationale und internationale F&E-Aktivitäten

Die angestrebten Untersuchungen zur energetischen Sanierung von Gebäuden ohne Beeinträchtigung des äußeren Erscheinungsbildes fügen sich nahtlos in eine Reihe von F&E-Aktivitäten in Deutschland und Europa ein. Neben Fragen im Zusammenhang mit der technischen Realisierung von Innendämmsystemen (Analyse und Beseitigung von Wärmebrücken, Vermeidung von Kondensatbildung in der Konstruktion, Gewährleistung des notwendigen Schlagregenschutzes und Sicherung einer dauerhaft schadensfreien Sanierung), rücken zunehmend auch Überlegungen hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Natur in den Focus der Betrachtungen. Fragen wie beispielsweise:

- Bis zu welcher Dämmstärke ist die Umsetzung von Innendämmmaßnahmen aus gesamtökologischer Sicht sinnvoll?
- In welcher Weise kann man durch eine Kombination von Innendämmmaßnahmen mit weiteren technischen Lösungen zu einem möglichst rigiden System gelangen, welches gegen negative Einflüsse weitgehend tolerant ist?
- Wie müssen ggf. weitere Anpassungen der Planungsrandbedingungen hinsichtlich der Behaglichkeitskriterien beim Einsatz von Flächenheizsystemen anstelle konventioneller Konvektionsheizungen in Betracht gezogen werden?

sollen im Sinne einer komplexen Betrachtung am konkreten Beispiel diskutiert werden. Der Ansatz zielt auf die Entwicklung rigider Systeme, welche langfristig eine schadensfreie Ertüchtigung erhaltenswerter Gebäude ermöglichen.

### 1.3 Sanierungsgegenstand und –potenzial in Hamburg

Speziell im Norden Deutschlands spielen ziegelsichtige (Klinker-) Fassaden eine herausragende Rolle im Bezug auf das Erscheinungsbild von Städten und Gemeinden. Diese im Rahmen energetischer Sanierungen mit einem „klassischen“ außenliegenden Wärmedämmverbundsystem zu überarbeiten, würde einen regelrechten Identitätsverlust nach sich ziehen, der aus der Sicht des Denkmalschutzamtes nicht hinnehmbar ist (eine Überarbeitung der backsteinernen Fassaden – bspw. mit einem Wärmedämmverbundsystem – würde die baugeschichtliche / baukulturelle Aussage für den Betrachter unzugänglich machen).

Aus diesem Grund setzt der Denkmalschutz einen Hauptschwerpunkt auf die behutsame Ertüchtigung des Gebäudebestandes unter Verwendung geeigneter Sanierungsstrategien. Neben der zwischenzeitlich vielfach zur Anwendung gebrachten Innendämmung als „Ideallösung“ für besonders schützenswerte Gebäude sollen gleichzeitig Möglichkeiten zu alternativen Heizungslösungen untersucht werden. Dabei soll nicht zwischen der einen oder der anderen Lösung entschieden werden – vielmehr geht es um eine sinnvolle Kombination verschiedener Strategien, so dass jeweils das optimale Aufwands-/Nutzen-Verhältnis erreicht werden kann.

Allein in der Freien und Hansestadt Hamburg verfügen die Wohnungsgesellschaften (öffentliche Träger) über einen immensen Bestand an sanierungsbedürftigen Wohnbauten, bei denen (neben der Wohnfunktion) das äußere Erscheinungsbild aus denkmalpflegerischer und städtebaulicher Sicht zu erhalten ist. Um das Wohnen in Städten (wie beispielsweise in Hamburg) auch weiterhin attraktiv und bezahlbar zu halten, müssen zwangsläufig ökonomisch optimale Lösungen entwickelt und umgesetzt werden. Soll der Gebäudebestand weiterhin genutzt werden, muss er in den nächsten Jahren energetisch umfassend aufgewertet werden, um steigenden Warmmieten entgegenzuwirken.

## 2 Untersuchungsgebiet

### 2.1 Allgemeine Darstellung

Das Denkmalschutzamt hat ein bestehendes Gebäude in Hamburg Veddel für die Untersuchung ausgewählt. Das Gebäude befindet sich also in einem Stadtteil im Bezirk Hamburg Mitte und ist somit infolge seiner verkehrsgünstigen Lage (ideale S-Bahn-Anbindung sowie kurze Entfernungen zum Zentrum, zur Universität etc.) ein besonders attraktiver Wohnstandort beispielsweise für Studenten. Der Anteil von Einwohnern mit vergleichsweise geringem Einkommen ist relativ hoch, so dass der Mietpreisfindung nach erfolgter Sanierung gewisse Grenzen gesetzt sind.

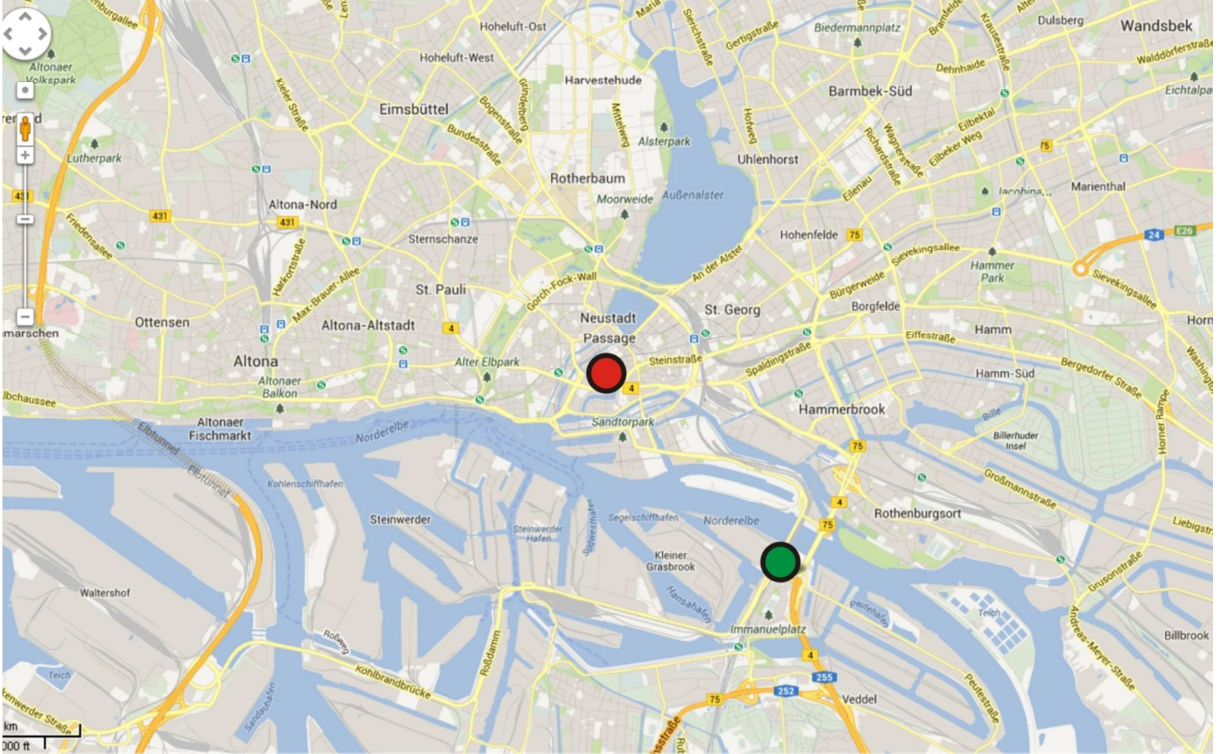


Abbildung 1 *Übersichtslageplan Untersuchungsgebiet – rot markiert: Stadtzentrum, grün markiert Standort in HH Veddel (Bildquelle: Google Maps, 30.06.2013)*

Die räumliche Einordnung des Untersuchungsgebietes ist in der Abbildung 1 dargestellt. Bei dem Gebäude („Passierzettel“ und „Am Gleise“) handelt es sich um einen langgestreckten Wohnblock welcher über 5 Vollgeschosse verfügt. Die Außenwandstärken betragen in der Regel ca. 36 cm und bestehen aus einer äußeren Ziegelschale (Klinker) und einem 24 cm starken Hintermauerwerk aus Kalksandsteinen.

Die Grundrisse der Wohneinheiten (siehe auch Abbildung 3) sind – gemessen an heutigen Planungsgrundsätzen – relativ klein, jedoch funktional so gegliedert, dass



sie dennoch für heutige Ansprüche gut hergerichtet werden können (die WE verfügen in der Regel über 2 – 3 Zimmer mit integrierter Küche und ein separates Bad mit Dusche und WC).

## 2.2 Auswahl der Wohneinheiten für das Monitoring

Die Auswahl der zu untersuchenden Wohneinheiten erfolgte in Abstimmung mit dem AG und der SAGA aus einem Pool leer stehender WE im Gebäude so, dass die Lage im Gebäude weitgehend vergleichbar ist (keine WE liegt im Erdgeschoss, keine im obersten Geschoss) und die Fassadenausrichtung einheitlich gewählt wurde. Die Lage der untersuchten WE im Gebäude kann der nachstehenden Abbildung 2 entnommen werden.



Abbildung 2 Lage der Wohneinheiten im Gebäude (rot markiert) – v.l.n.r.: Am Gleise 2, Passierzettel 9, Passierzettel 3, Passierzettel 1  
(Bildquelle: Google Maps, 30.06.2013)

Die Wohneinheiten sind grundsätzlich ähnlich geschnitten. Die Gestaltung der Grundrisse und die lagemäßige Einordnung der Messstellen ist in der Abbildung 3 grafisch dargestellt.



Abbildung 3 Grundrisse der betrachteten WE und Lage der eingeordneten Messstellen (Quelle Grundrissplan: Aufmaß Spehr Architekten, August 2012)

### 3 Grundlegende bauphysikalische Zusammenhänge

Der Transport von Wärme und Feuchte innerhalb von Baukonstruktionen muss stets im Zusammenhang betrachtet werden. Vor allem bei Innendämmmaßnahmen ist der Feuchteverteilung in der Konstruktion besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da infolge der Dämmung die Konstruktion im Winterfall stärker auskühlen kann und so möglicherweise der Gefahr von Frostschäden ausgesetzt wird.

Beide Transportvorgänge hängen von den jeweils innen und außen herrschenden Randbedingungen ab. So erfolgt der Wärmetransport (Transmission) von der wärmeren zur kälteren Seite der Konstruktion. Wasserdampf wird in Richtung des Dampfdruckgefälles transportiert (und ist in der Regel gleichgerichtet mit dem Wärmetransport). Je höher die Differenzen (Gradienten) der Randbedingungen sind um so größer ist der Wärme- bzw. der Dampfstrom.

Neben gasförmigem Wasser wird durch kapillare Wasserleitung auch Flüssigwasser in der Konstruktion transportiert. Hier spielen vor allem die Baustoffeigenschaften (die Porosität, der Wasseraufnahmekoeffizient und die kapillare Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Sättigungsgraden) eine große Rolle.

Die Stoffeigenschaften, welche den Wärme- und Feuchtetransport beeinflussen werden oft vereinfachend als statische Größen angenommen. Genau genommen hängt jedoch beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes von der im Stoff befindlichen Wassermenge ab. Die Wasseraufnahme und -leitung ist ebenfalls abhängig vom Feuchtezustand (ein vollkommen trockenes Material nimmt in der Regel weniger gut Wasserauf als ein bereits befeuchteter Stoff). Ferner bestehen auch Abhängigkeiten zwischen der Temperatur eines Materials und seiner Wärmeleitfähigkeit.

Um diese komplexen Zusammenhänge im Modell hinreichend genau abbilden zu können, werden auf der Grundlage von Messreihen im Labor entsprechende Materialfunktionen erstellt, die im Modell hinterlegt werden. Das Simulationsverfahren selbst berechnet die Zustände in der Konstruktion in kurzen Zeitschritten, so dass neben den von außen wirkenden Randbedingungen jeweils die Ergebnisse des vorangegangenen Schritts (Wärme- und Feuchteverteilung in der Konstruktion) als Ausgangssituation für den nächsten Berechnungsschritt verwendet werden.

Die Berechnungsmethode ermöglicht eine relativ genaue Abbildung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Baukonstruktionen, so dass deren Verhalten wesentlich besser beurteilt werden kann, als mit den bisher verwendeten analytischen Verfahren.

## 4 Untersuchungsdesign

### 4.1 Vergleichsfälle

Gemäß der Aufgabenstellung sollen vier Vergleichsfälle betrachtet werden (siehe nachfolgende Aufzählung). Besonders zu beachten ist dabei, dass es sich bei den Vergleichsfällen nicht um tatsächliche Sanierungslösungen handelt. Im Sinne eines experimentellen Ansatzes sollen vielmehr Extremfälle gemessen und bewertet werden, die dann als Grundlage für die Bewertung einer Vielzahl von Varianten zur energetischen Ertüchtigung von Bestandsgebäuden mittels numerischer Simulation verwendet werden können. So sind beispielweise Optimierungsfragen hinsichtlich der zu verwendenden Dämmstärken für die Umsetzung verschiedener Varianten (konvektiv beheizte Räume vs. Wandflächentemperierung) zu untersuchen und zu bewerten. Die Vergleichsfälle umfassen:

- einen Referenzfall, in dem die Außenwandkonstruktion ungedämmt verbleibt und die Heizung mittels konventionellen Heizkörpern (konvektiv) erfolgt. Dieser Fall widerspiegelt im Wesentlichen die im Bestand vorzufindende Situation und soll zur Bewertung der nachfolgend genannten Fälle verwendet werden.
- Ein Planfall 1, in dem die Außenwandkonstruktion mit einer Innendämmung versehen wird und die Heizung mittels konventionellen Heizkörpern (konvektiv) realisiert wird;
- Ein Planfall 2, in dem die Außenwandkonstruktion ungedämmt verbleibt und die Heizung mittels einer Wandflächentemperierung erfolgt;
- Ein Planfall 3, in dem die Außenwandkonstruktion mit einer Innendämmung versehen und – analog zu Planfall 2 – mittels einer Wandflächentemperierung beheizt wird.

Alle Varianten wurden hinsichtlich der Wärmeerzeugung gleich behandelt und erhalten einen elektrisch betriebenen Wärmeerzeuger mit separatem Stromzähler, so dass der Heizenergiebedarf anhand des Stromverbrauches verglichen werden kann.

Eine außenseitige Ertüchtigung der Fassade zur Gewährleistung des Schlagregenschutzes (gemäß WTA-Merkblatt Voraussetzung bei der Umsetzung von Innendämmmaßnahmen) wurde Anfangs in Betracht gezogen, im weiteren Projektverlauf jedoch verworfen, da

- sich die technische Realisierung im Rahmen eines Experiments als unangemessen aufwendig erwies,
- die SAGA nach Abschluss des Experiments ohnehin die Überarbeitung des gesamten Gebäudes mit einem Wärmedämmverbundsystem plant und

- so die tatsächlichen negativen Auswirkungen eines mangelhaften Schlagregenschutzes im Experiment mit untersucht werden können.

### 4.2 Hardwareausstattung der Messstellen

Die ausgewählten Wohneinheiten wurden mit entsprechender Messtechnik ausgestattet, so dass alle für die Untersuchung notwendigen physikalischen Messgrößen erfasst werden können. Die nachfolgende Abbildung 4 verdeutlicht den Aufbau der einzelnen Messstrecken.

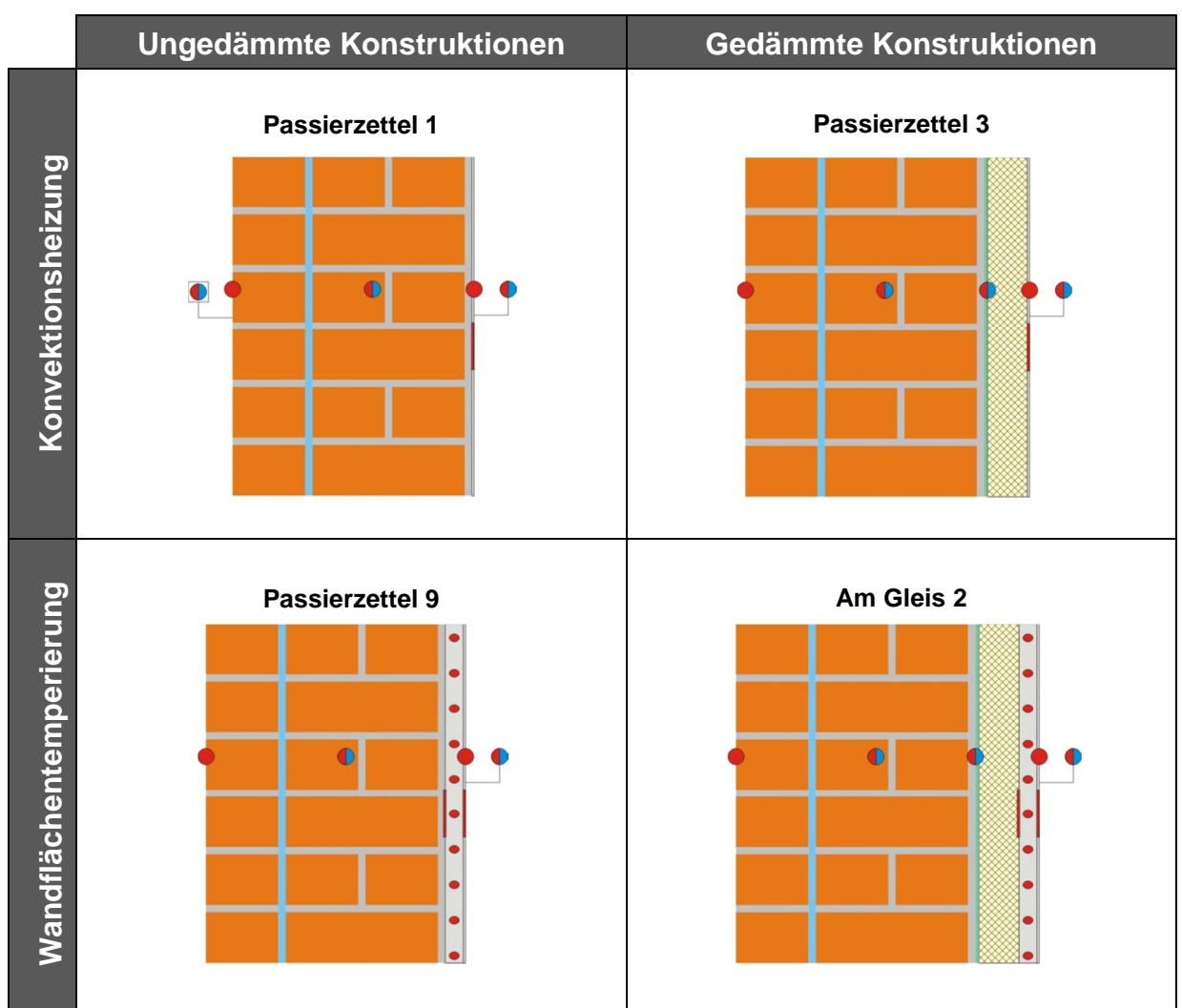


Abbildung 4 *Anordnung der Sensoren an den unterschiedlichen Messstrecken*

**Legende Sensortechnik**

- Temperaturfühler (NTC)
- Temperatur-/Luftfeuchtefühler
- Temperatur-/Luftfeuchtefühler mit Wetterschutzgehäuse
- | Wärmeflussplatte Wandoberfläche



### 4.3 Lage der Messstellen im Gebäude / in den WE

Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt das Gebäude am Passierzettel in Hamburg-Veddel im Luftbild. Die roten Punkte markieren die vier Wohneinheiten, die für das Monitoring ausgewählt wurden.

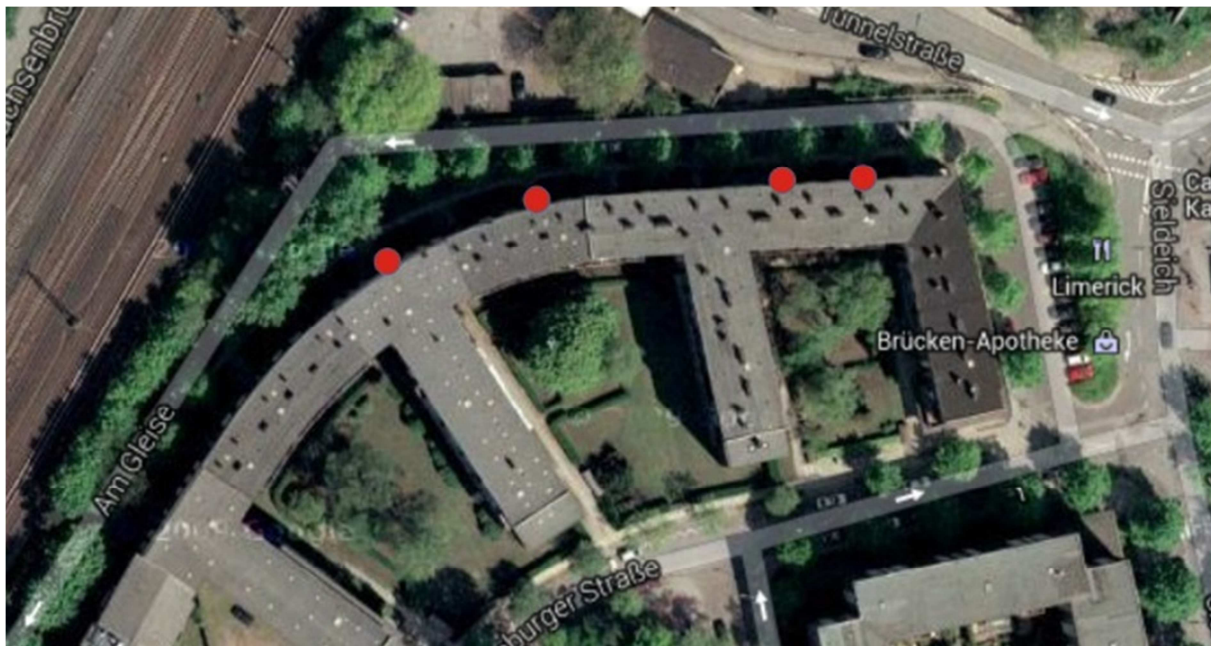


Abbildung 5 *Lage der untersuchten WE am Standort Hamburg Veddel – von links nach rechts: Am Gleis 2 (2. OG links), Passierzettel 9 (1. OG rechts), Passierzettel 3 (2. OG links) und Passierzettel 1 (3. OG rechts)*

Die Lage der Wohneinheiten hinsichtlich der Fassadenausrichtung ist demnach weitgehend homogen zu betrachten. Bei der Auswahl der vertikalen Position im Gebäude wurde ebenfalls eine jeweils vergleichbare Situation angestrebt (kein Erdgeschoss bzw. Hochparterre sowie keine WE im obersten Geschoss).

### 4.4 Beschreibung der erfassten Daten

Folgende Primärdaten wurden erfasst:

- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Außenluft;
- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Raumluft;
- Oberflächentemperatur der Konstruktion (sowohl innen als auch außen);
- Temperatur und relative Luftfeuchte im Mauerwerk;
- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Kleberebene (nur gedämmte Varianten);

- Wärmefluss auf der raumseitigen Wandoberfläche sowie (nur bei Varianten mit Wandflächentemperierung) zwischen der Temperierung und der Bestandswand.

Die Erfassung der Daten erfolgt durch Datenlogger, welche in der jeweiligen WE dezentral angeordnet und zwischen den WE miteinander vernetzt wurden. Die Datenabfrage erfolgt per DFÜ (Modem).

#### **4.5 Beschreibung der abgeleiteten Daten**

Eine vollständige Beurteilung der bauphysikalischen Verhältnisse an einer Konstruktion allein anhand der Primärdaten ist nicht möglich. So können beispielsweise die relativen Luftfeuchten verschiedener Messpunkte wegen der stets vorhandenen Temperaturdifferenzen nicht direkt miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund werden aus den erfassten Messwerten Sekundärdaten wie:

- der Wassergehalt in der Außenluft und der Raumluft,
- die Taupunkttemperaturen, welche sich anhand der jeweils herrschenden Temperatur und relativen Luftfeuchten ergeben,
- die instationären U-Werte der Außenwandkonstruktion (Ermittlung aus Wärmefluss und Temperaturdifferenz).

abgeleitet. Die Sekundärdaten werden analog zu den erfassten Messwerten aufbereitet und grafisch dargestellt.

#### **4.6 Ergänzung der Datenbasis durch Messdaten des DWD**

Ergänzend zu den am Standort erfassten Messdaten werden Wetterdaten des DWD von der Station Hamburg Fuhlsbüttel betrachtet. Dies ermöglicht zum Einen den Vergleich der selbst erfassten Messdaten (Temperaturen und Luftfeuchten) mit den in Fuhlsbüttel erfassten amtlichen Daten und die Ergänzung des eigenen Datenmassives mit den notwendigen Informationen bezüglich der Strahlungskomponenten (Globalstrahlung, Direktstrahlung), der Regenmengen sowie der jeweils gemessenen Windverhältnisse. Diese werden ebenfalls als Eingangsgrößen für die instationäre Simulation verwendet.

#### **4.7 Aufbereitung der Daten als Eingangsgrößen für die Simulationsrechnungen**

Alle Daten werden mittels eines entsprechenden Konverters so aufbereitet, dass sie mit dem Simulationstool DELPHIN verwendet werden können. Dabei entstehen zum einen Klimarandbedingungen (Lufttemperaturen und relative Luftfeuchten außerhalb des Gebäudes und in den Räumen), welche als Eingangsgrößen für die instationäre

Simulation verwendet werden. Darüber hinaus werden Vergleichswerte erstellt (beispielsweise die Ganglinien der Temperatur und der relativen Luftfeuchte innerhalb der Konstruktion), welche anschließend mit den Simulationsergebnissen verglichen und so zur Kalibrierung der Modelle herangezogen werden können.

## 5 Messergebnisse

### 5.1 Erfasste Rohdaten / Beurteilung der Rohdatenqualität

Die Erfassung der Rohdaten erfolgte nach abschließender Inbetriebnahme der Kommunikationstechnik im Dezember 2012. Die Daten liegen demnach ab Beginn des Jahres 2013 vollständig vor. Im Rahmen der laufenden Datenübernahme und -plausibilisierung konnte eine hohe Qualität der Rohdaten festgestellt werden.

Ein Sensorausfall musste in der WE am Passierzettel 9 festgestellt werden (Temperatur-/Feuchtefühler in der Bestandskonstruktion). Der defekte Sensor wurde im Juni 2013 vor Ort ausgetauscht und funktioniert seitdem wieder einwandfrei.

Die erfassten Rohdaten werden in den folgenden Abbildungen dargestellt und kurz kommentiert.

### 5.2 Klimarandbedingungen (Außenluft und Raumlufte)

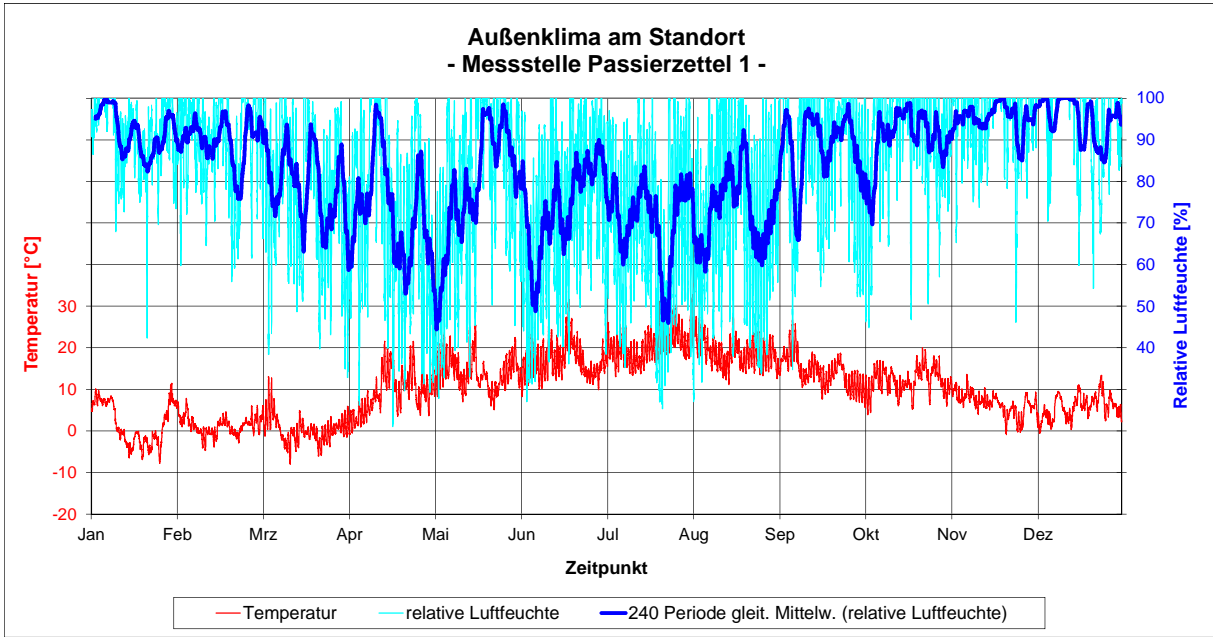


Abbildung 6 Außenklima am Standort (Passierzettel 1)

Abbildung 6 zeigt die am Standort erfassten Außenklimabedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte). Die Skalenwerte für die Temperaturkurve befinden sich auf der primären Größenachse. Die Werte für die relativen Luftfeuchten sind auf der sekundären Größenachse ablesbar. Um die Lesbarkeit der Kurve für die relative Luftfeuchte zu verbessern, wurde zusätzlich ein gleitender Durchschnittswert (240 Messwerte) eingefügt.

Prinzipiell widerspiegeln die beiden Kurven einen standorttypischen Wetterverlauf, gekennzeichnet von relativ hohen Luftfeuchtwerten und gemäßigten Temperaturen. Die nachfolgenden Abbildungen stellen das Raumklima in den verschiedenen Wohneinheiten dar.

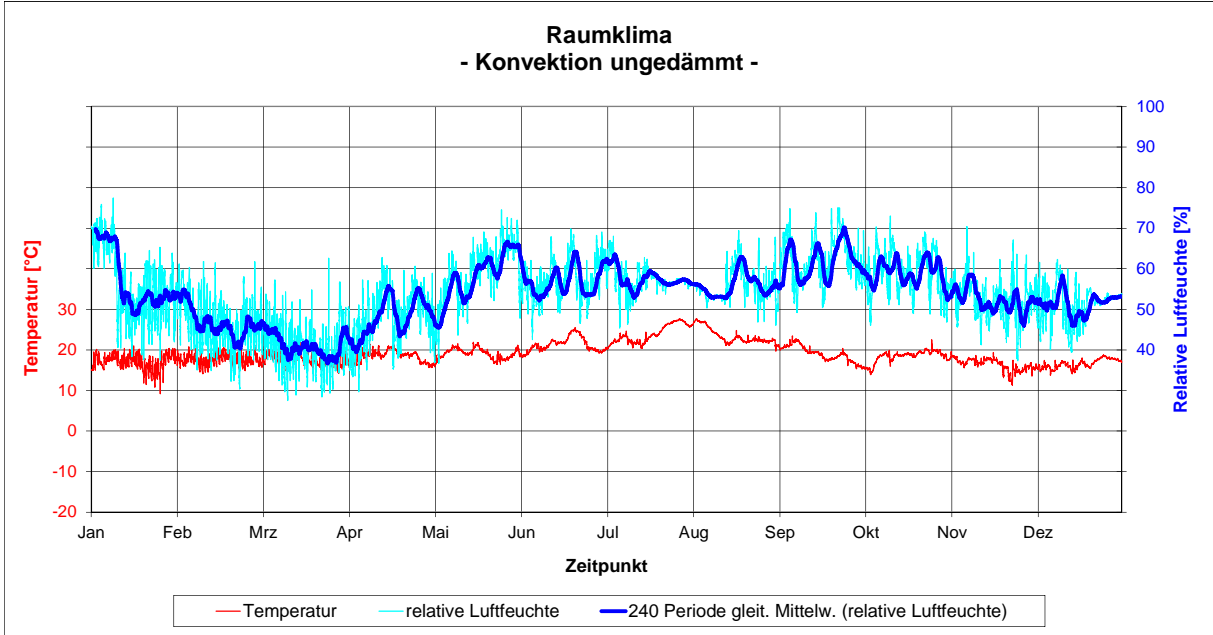


Abbildung 7 *Raumklima konvektiv beheizte WE ohne Dämmung*

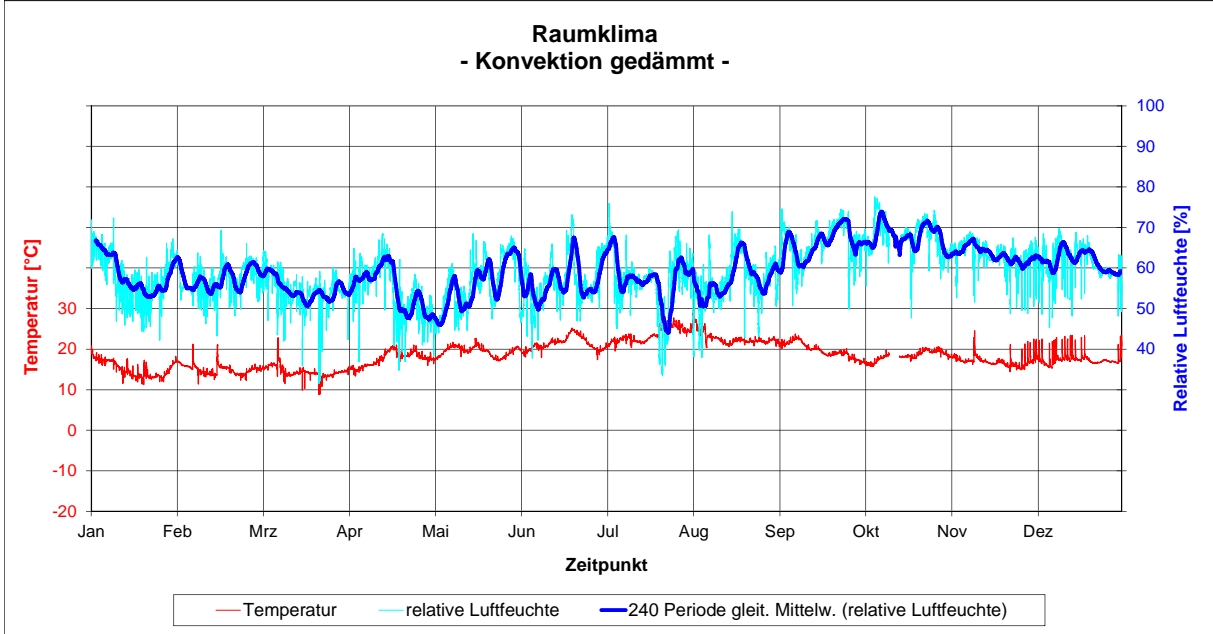


Abbildung 8 *Raumklima konvektiv beheizte WE mit innen gedämmter Fassade*

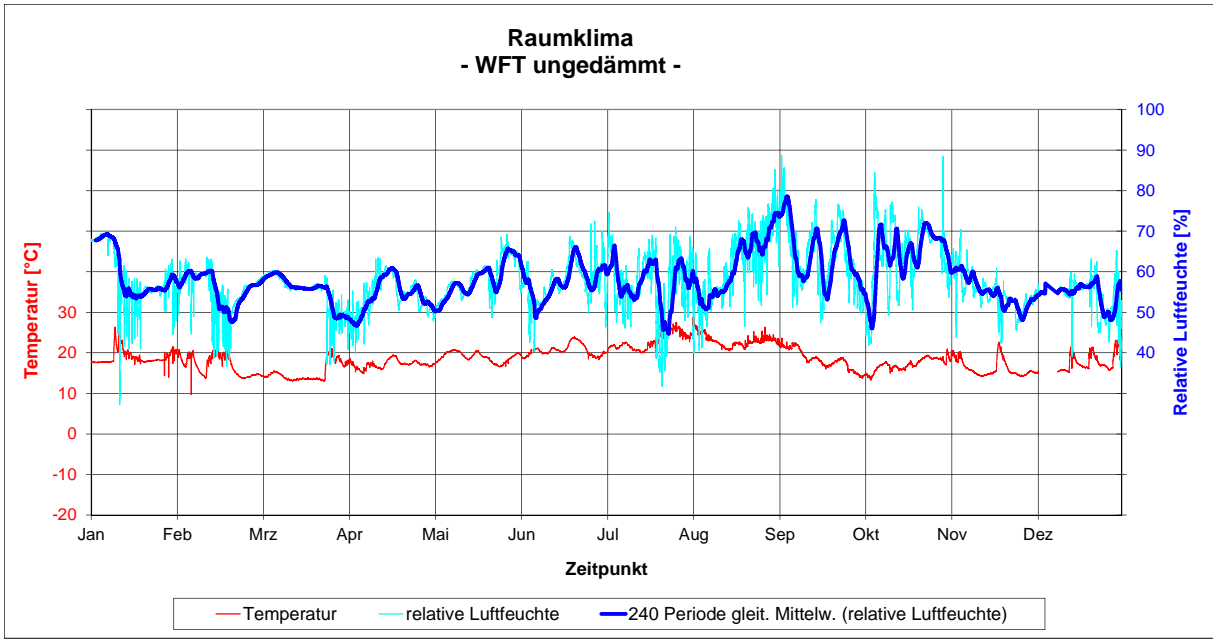


Abbildung 9 *Raumklima WE mit Wandflächentemperierung und ungedämmter Fassade*

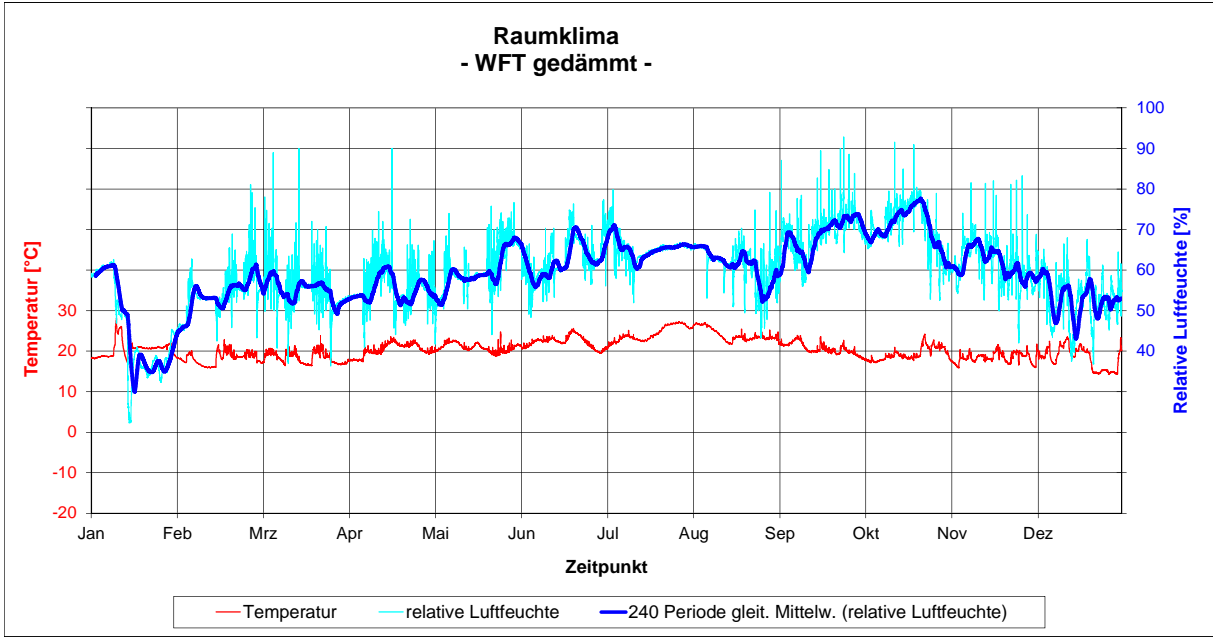


Abbildung 10 *Raumklima WE mit Wandflächentemperierung und innen gedämmter Fassade*

Prinzipiell kann festgestellt werden, dass die Raumtemperaturen vergleichsweise niedrig liegen, was auf gewisse Sparzwänge bei den Mietern schließen lässt. Man neigt offenbar eher dazu wärmere Kleidung zu tragen um Heizkosten zu sparen. Aus der Sicht der Baukonstruktion kann die Raumtemperatur jedoch noch als unkritisch angesehen werden.

Eine Besonderheit ist in der WE mit Wandflächentemperierung und ungedämmter Fassade festzustellen. Hier wurde über einen längeren Zeitraum im März die Heizung sehr zurückhaltend gefahren – die Temperaturen liegen dann bei nur knapp 15 °C.

**5.3 Oberflächentemperaturen der Konstruktion (außen und innen)**

Die folgende Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Temperaturen auf der Außenoberfläche der Fassade.

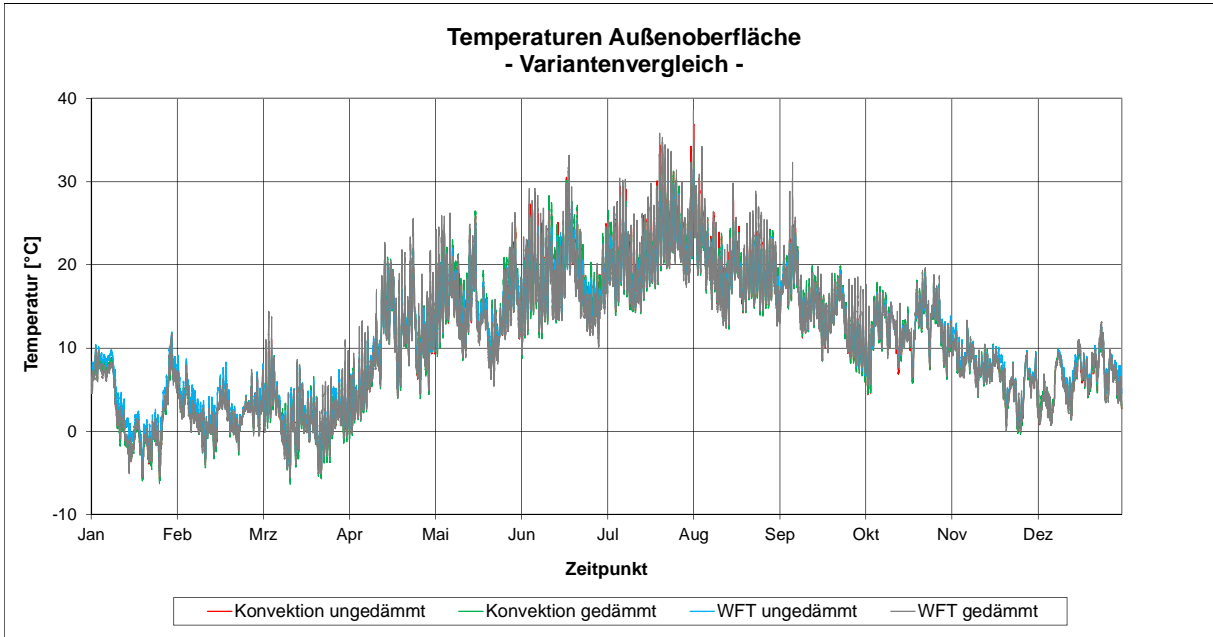


Abbildung 11 *Oberflächentemperaturen auf der Außenseite der Fassade*

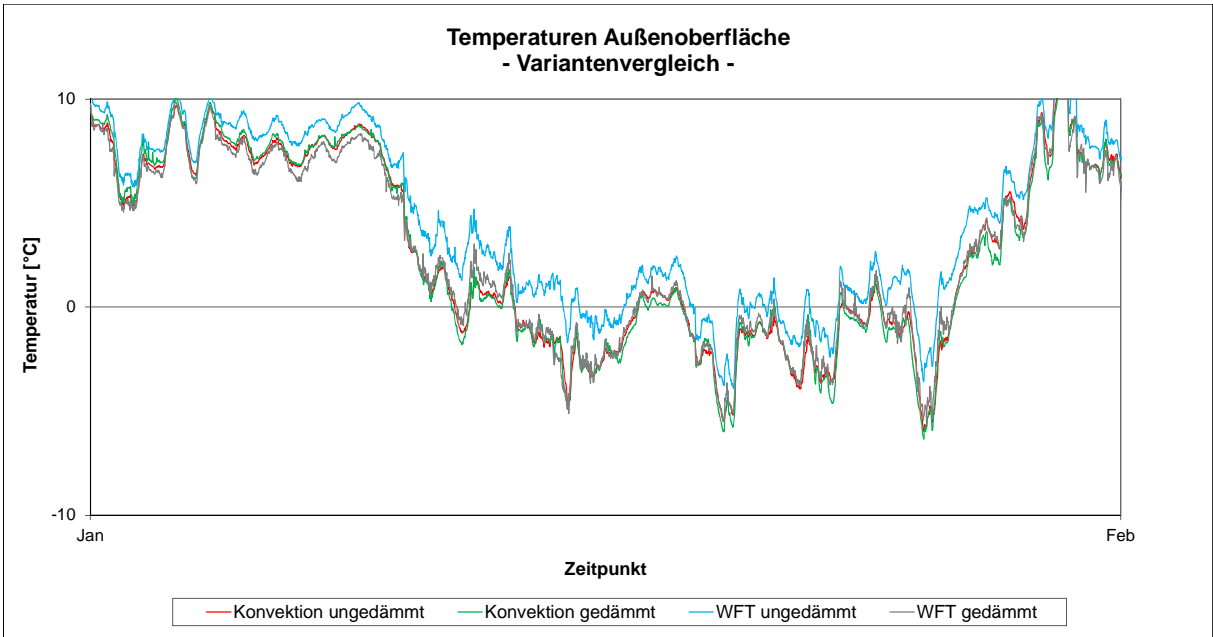




Abbildung 12 *Oberflächentemperaturen – Detailansicht für den Winterfall*

Grundsätzlich verlaufen die Temperaturen an den unterschiedlichen WE nahezu gleich. Bei einer näheren Betrachtung (siehe Abbildung 12) werden jedoch signifikante Unterschiede deutlich. Insbesondere der Vergleichsfall mit der Wandflächentemperatur auf der ungedämmten Wandkonstruktion hebt sich deutlich ab – die Temperaturdifferenz zu den übrigen Fällen beträgt zum Teil bis zu 5 K.

Die Darstellungen der raumseitigen Oberflächentemperaturen sind in den nächsten Abbildungen ersichtlich. Abbildung 13 gibt einen Überblick über alle erfassten Daten während die nachfolgende Abbildung 14 einen Ausschnitt zur detaillierten Betrachtung zum Gegenstand hat.

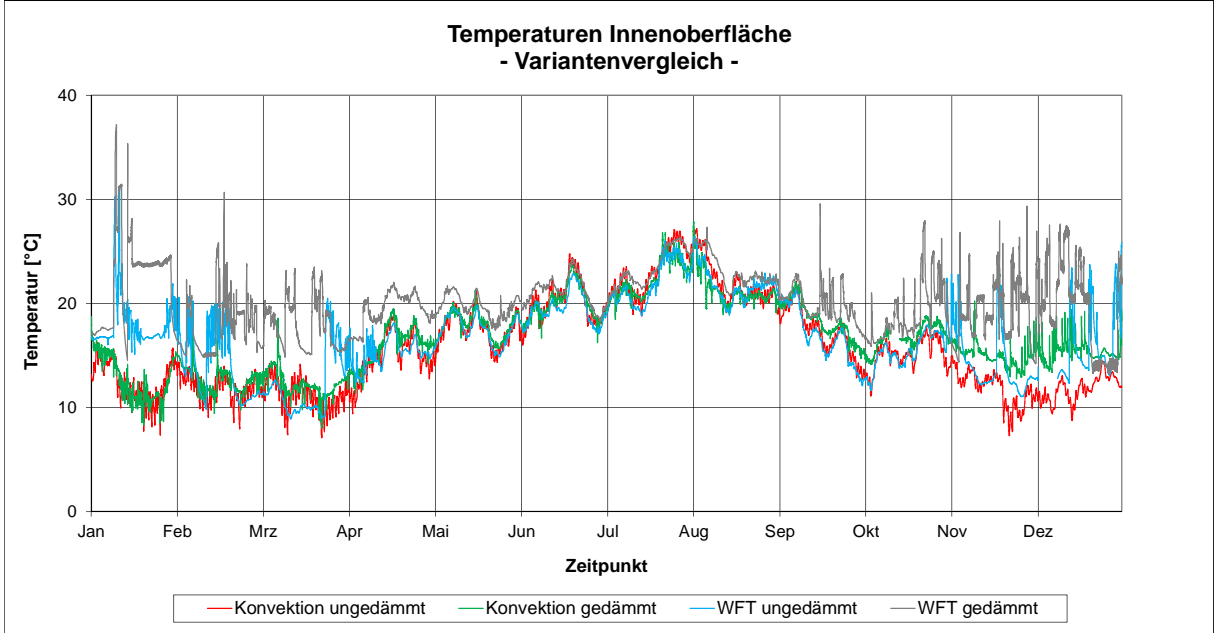


Abbildung 13 *Raumseitige Wandoberflächentemperaturen - Überblick*



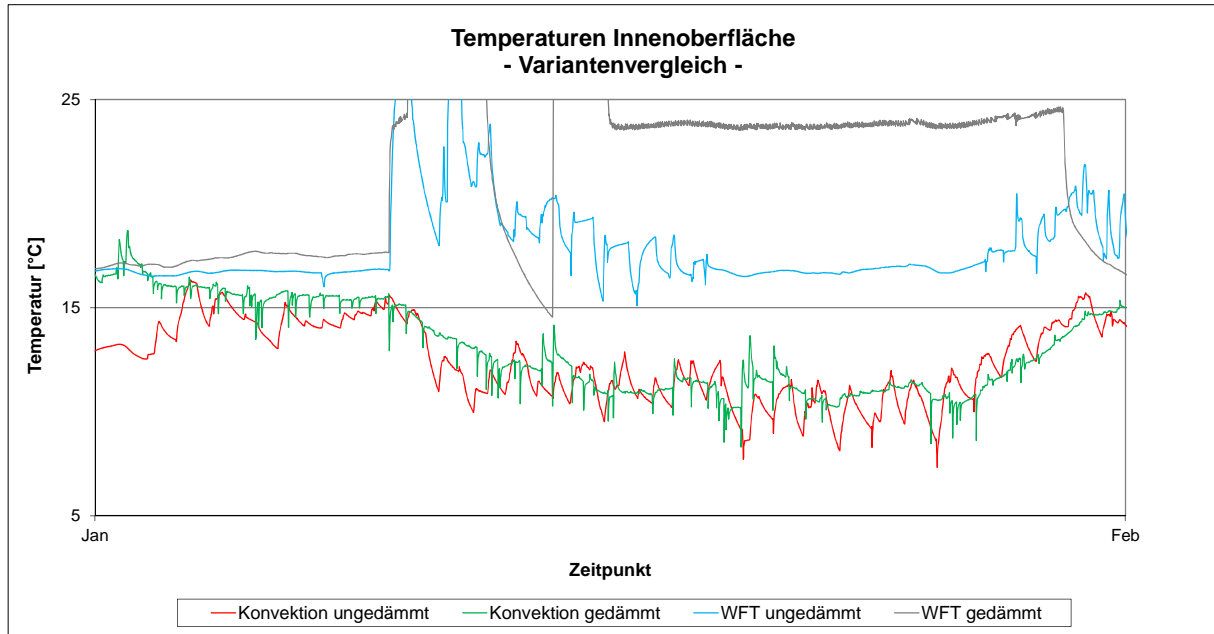


Abbildung 14 *Raumseitige Wandoberflächentemperaturen – Detailansicht 1*

In der detaillierten Darstellung wird deutlich, dass für die konvektiv beheizte Wohnung mit innen gedämmter Fassade deutlich geringere Schwankungen der Oberflächentemperatur gemessen wurden als bei der ungedämmten Variante. Ebenso liegen hier die gemessenen Minimalwerte deutlich über denen der ungedämmten Konstruktion. In einigen Fällen ist der Mindestwärmeschutz für die ungedämmte Konstruktion nicht gewährleistet. Die Anfälligkeit der Konstruktion gegen Oberflächenkondensat und Schimmelbildung wird erwartungsgemäß durch die Dämmung erheblich reduziert. Bei der Betrachtung der beiden Systeme mit Wandflächentemperierung sind logischerweise deutlich höhere Wandoberflächentemperaturen festzustellen. Wird jedoch die Heizung bei zu niedrigen Außentemperaturen stark gedrosselt oder gar abgeschaltet, besteht bei der Wandflächentemperierung ohne Dämmung ebenfalls die Gefahr, dass die Oberflächentemperaturen stark abfallen.

#### 5.4 Hygrothermische Zustände innerhalb der Konstruktion

Die hygrothermischen Zustände in der Bestandskonstruktion sind Gegenstand der folgenden Darstellungen. Abbildung 15 zeigt den Temperaturverlauf in der Bestandskonstruktion der verschiedenen WE, Abbildung 16 beinhaltet den dazu gehörenden Verlauf der relativen Luftfeuchten. Wie bereits erläutert, musste in der WE Passierzettel 9 der Sensor zwischenzeitlich gewechselt werden. Der Fehler machte sich Anfang März durch das Abdriften der Temperatur nach oben bemerkbar. Vermutliche Ursache ist ein Kurzschluss im Sensor, der durch das Eindringen von Feuchtigkeit ermöglicht wurde. Damit sinkt der Widerstand des Sensors (NTC), was am Daten-

logger mit einem höheren Strom als höhere Temperatur interpretiert wird. Seit dem Ersatz des Sensors im Juni 2013 wurden wieder korrekte Werte übermittelt, so dass die Messdatenerhebung wie geplant fortgesetzt werden konnte. Die fehlenden Datensätze werden durch geeignete Annahmen für die Simulation ersatzweise vorbereitet.

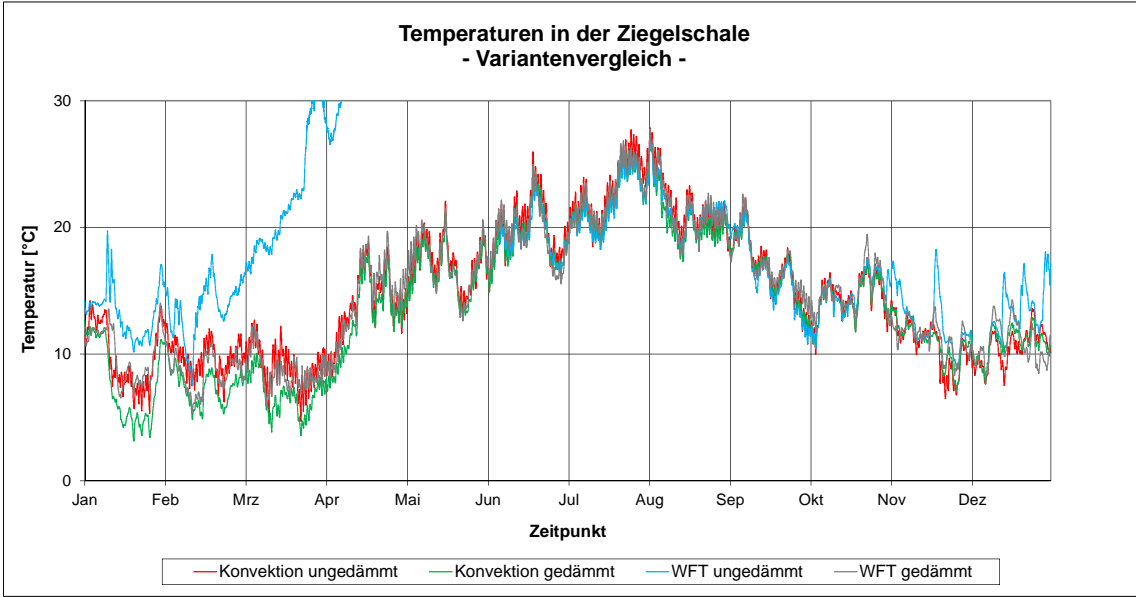


Abbildung 15 *Temperaturen in der Bestandskonstruktion*

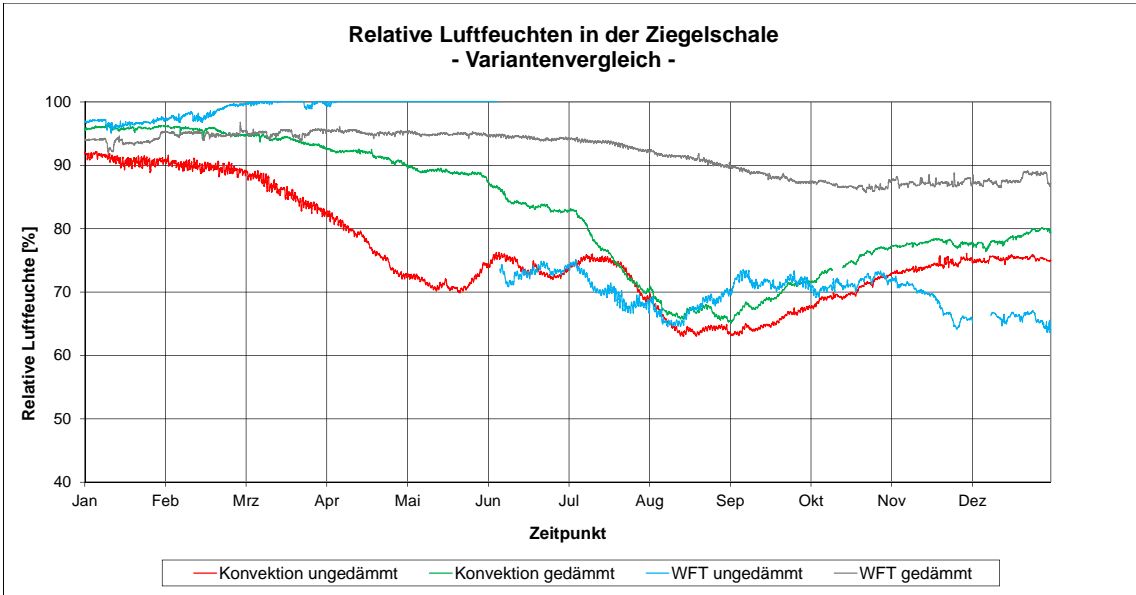


Abbildung 16 *Relative Luftfeuchten in der Bestandskonstruktion*

Für die beiden mit Innendämmung ausgestatteten Varianten wurden die Temperaturen und relativen Luftfeuchten zusätzlich direkt hinter der Dämmung (in der Kleber Ebene) gemessen. Da sich in diesem Bereich eine Unstetigkeit im Temperaturgradi-

enten befindet, kann in Abhängigkeit der transportierten Menge / Konzentration von Wasserdampf zeitweilig Kondensat anfallen. Die Messungen sollten zeigen, ob das anfallende Kondensat ordnungsgemäß austrocknet und die Konstruktion so dauerhaft schadfrei gehalten werden kann. Die grafische Darstellung der Temperaturverläufe und der relativen Luftfeuchten hinter der Dämmung ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 enthalten.

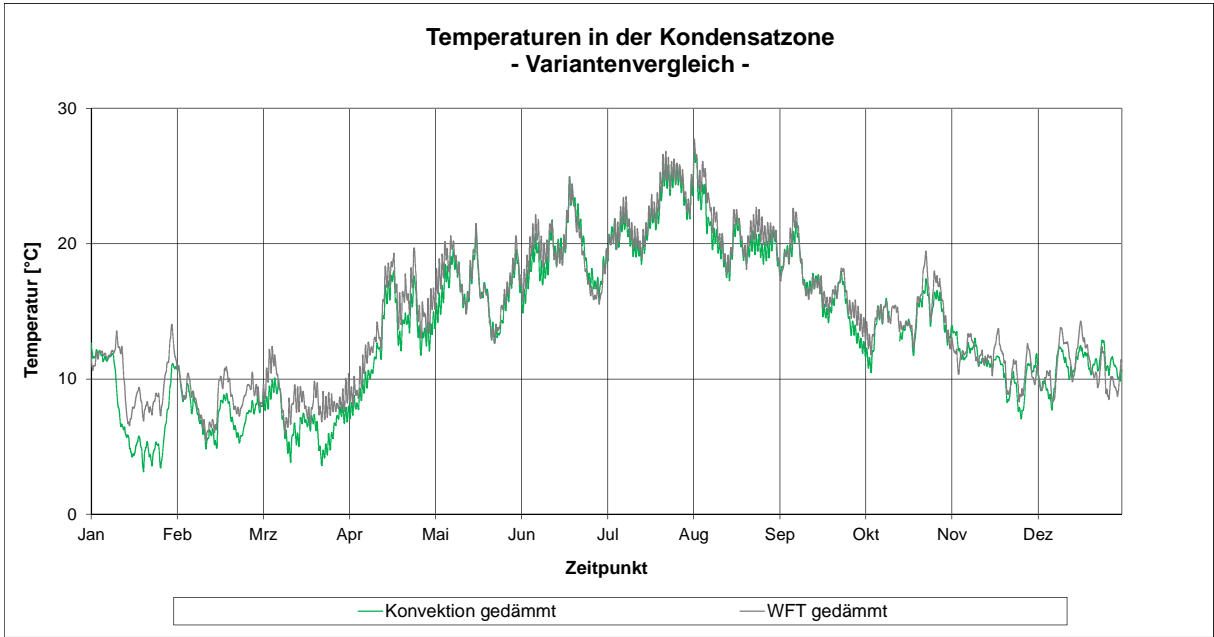


Abbildung 17 *Temperaturen hinter der Dämmebene*

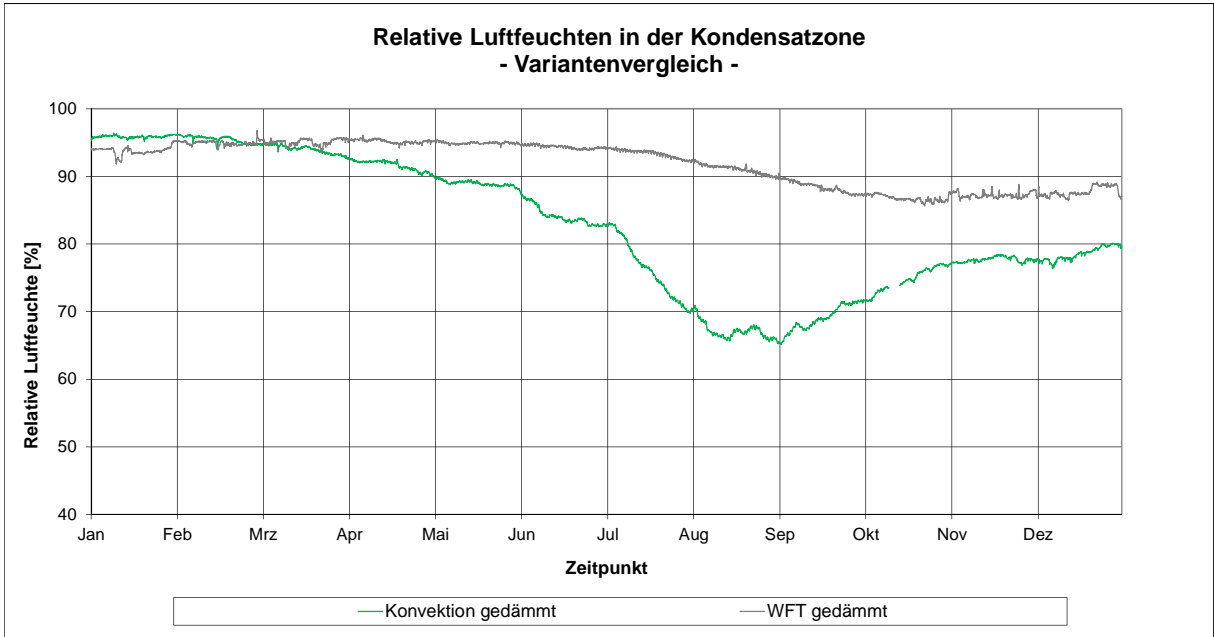


Abbildung 18 *Relative Luftfeuchten hinter der Dämmebene*

Bei der vergleichenden Betrachtung der raum- und außenseitigen Klimarandbedingungen mit den innerhalb der Konstruktion gemessenen Werten wird deutlich, dass die Schwankungen der Temperaturen und der relativen Luftfeuchten in der Konstruktion weit geringer ausfallen, als in der Raum- bzw. Außenluft. Die Trägheit der Konstruktion bewirkt, dass kurzzeitige Änderungen der äußeren Randbedingungen kaum Auswirkungen auf den hygrothermischen Zustand innerhalb der Konstruktion haben (dies gilt insbesondere für schwere Bauwerke).

Die getroffene Aussage bezieht nicht nur auf den Einfluss der Temperaturen sondern ebenso auf den Einfluss auftretender Strahlung (diffus, direkt). Nachstehende Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Temperaturen an und innerhalb der Konstruktion an einen Wintertag (Datenquelle: Untersuchung Hamburg Passierzettel – Messdaten und Simulationsdaten). Im Modell wurde die tatsächlich vorhandene Konstruktion abgebildet (Nordfassade). Als Klimarandbedingungen wurden die gemessenen Temperaturen und die vom DWD übermittelten Strahlungsdaten verwendet. Mittels numerischer Simulation können so die resultierenden Temperaturen in den oberflächennahen Schichten des Mauerwerks berechnet werden. Entsprechende virtuelle Sensoren wurden beginnend an der Außenoberfläche im Abstand von je einem Zentimeter angeordnet.

Die Strahlung (im Diagramm blau dargestellt) steigt beginnend um 8.00 Uhr an, erreicht gegen 11.00 Uhr ihren Maximalwert und fällt gegen 16.00 Uhr auf 0 zurück. Die Außenluft erwärmt sich zeitversetzt beginnend um 10.00 Uhr, erreicht gegen 15.00 Uhr ihr Maximum und fällt anschließend bis ca. 19.00 Uhr auf den Ausgangszustand zurück.

Oberflächennah bewirken die Temperatur- und Strahlungsänderungen auf der Südfassade (siehe Abbildung 20) einen Temperaturanstieg von ca. 6 – 7 Kelvin (im Diagramm durch die stärkere rote Linie mit der Beschriftung „0 cm Tiefe“ dargestellt). Im Inneren der Konstruktion resultieren bereits in einem Abstand von ca. 10 cm von der äußeren Wandoberfläche kaum mehr Temperaturänderungen (im Diagramm durch die stärkere blaue Linie mit der Beschriftung „10 cm Tiefe“ dargestellt).

Sofort mit Abfall der Strahlungsintensität beginnen sich auch die Temperaturen innerhalb der Konstruktion wieder dem Vorniveau anzugleichen. Bereits gegen 17.00 Uhr ist der Ausgangszustand nahezu wieder erreicht.

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass durch die beschriebenen äußeren Einwirkungen keine signifikanten Veränderungen der hygrothermischen Verhältnisse bewirkt werden. Eine Erwärmung und damit verbundene Austrocknung der Konstruktion durch Sonneneinstrahlung im Winter kann allenfalls die obersten Schichten betreffen und ist keinesfalls für das Innenklima relevant.

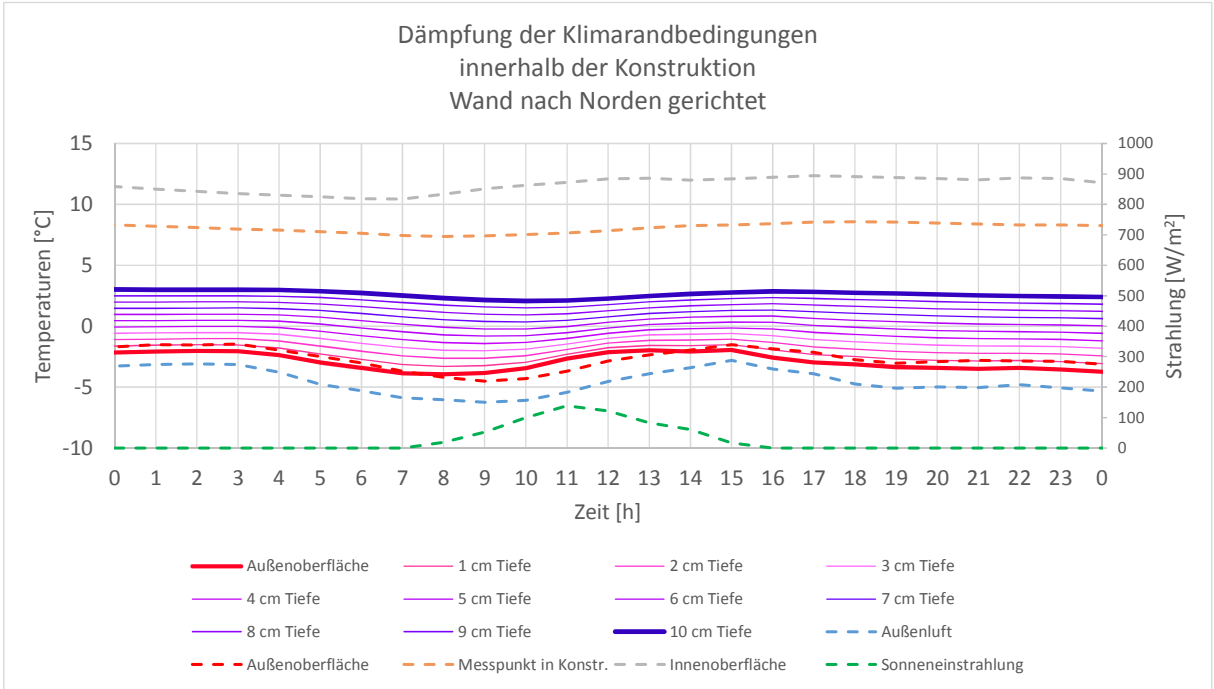


Abbildung 19 *Betrachtung des kurzzeitigen Einflusses der äußeren Klimarandbedingungen auf das thermische Verhalten der Konstruktion. Gemessene Daten sind getrichelt dargestellt, berechnete Daten mit durchgezogenen Linien*

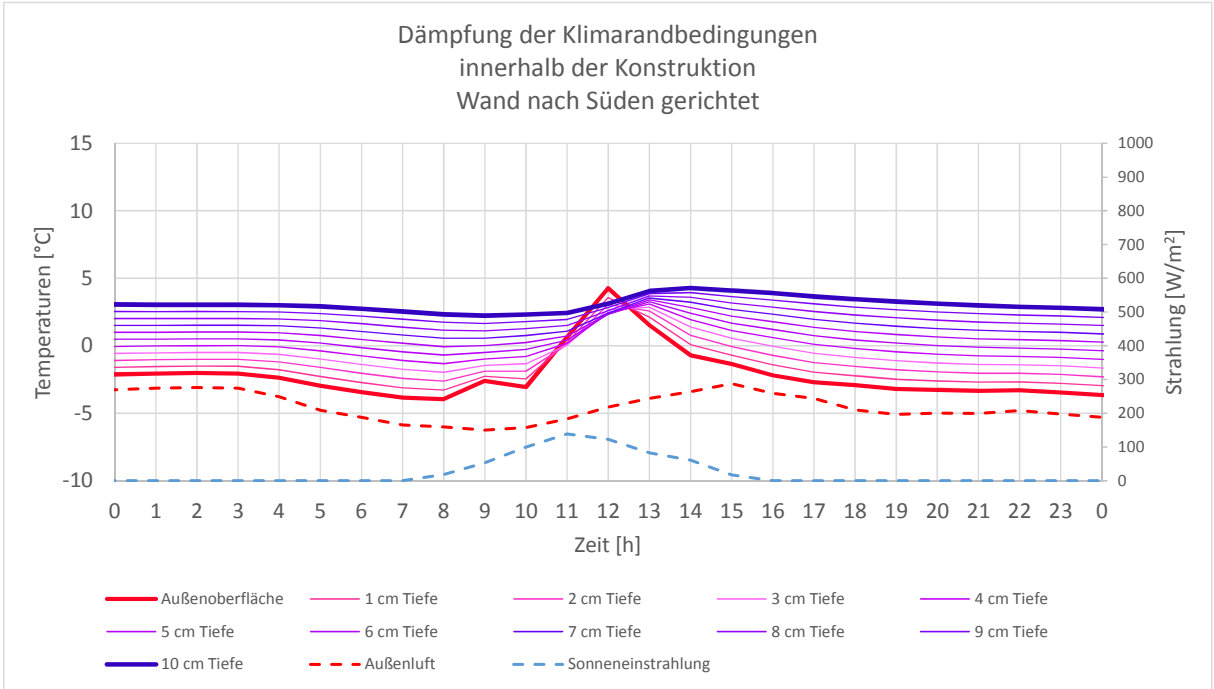


Abbildung 20 *Vergleichsbetrachtung für eine nach Süden ausgerichtete Fassade*

**5.5 Darstellung abgeleiteter Größen**

Da ein direkter Vergleich der Messdaten in einigen Fällen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (z.B. Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur), wurden indirekte Größen rechnerisch abgeleitet. Die nachfolgende Grafik zeigt die ermittelten Wassergehalte in der Außen- und Raumluft.

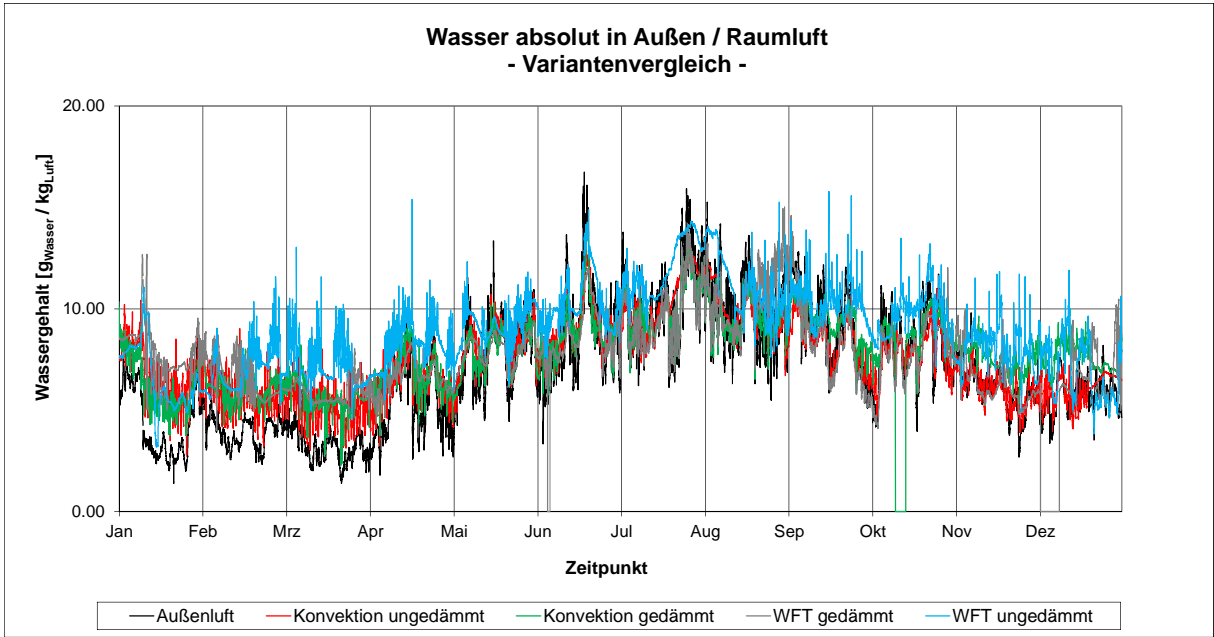


Abbildung 21 Vergleich der Wassermengen in der Außenluft und in der Raumluft

Zur Gewährleistung des Feuchteschutzes und zur Vermeidung von Schimmelbildung auf der raumseitigen Wandoberfläche ist sicher zu stellen, dass die Taupunkttemperatur der Raumluft – also die Temperatur bei der das Wasser in der Raumluft als Kondensat ausfallen würde – stets geringer ist als die Oberflächentemperatur der Konstruktion. Anderenfalls könnte sich Kondensat an der Bauteiloberfläche absetzen, in die Konstruktion eindringen und zu einer zunehmenden Durchfeuchtung der Konstruktion führen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Taupunkttemperaturen der Raumluft mit den gemessenen Wandoberflächentemperaturen. Es wird deutlich, dass im ungestörten Wandbereich keine Taupunktunterschreitungen an den Oberflächen eintreten. Zu beachten ist jedoch, dass die Oberflächentemperaturen im Bereich kritischer konstruktiver Details bzw. geometrischer Wärmebrücken häufig ca. 5 Kelvin unter der Wandoberflächentemperatur liegen können. Um auch hier den Mindestwärmeschutzes und des Feuchteschutzes zu gewährleisten, sind gesonderte Nachweisrechnungen zu führen.

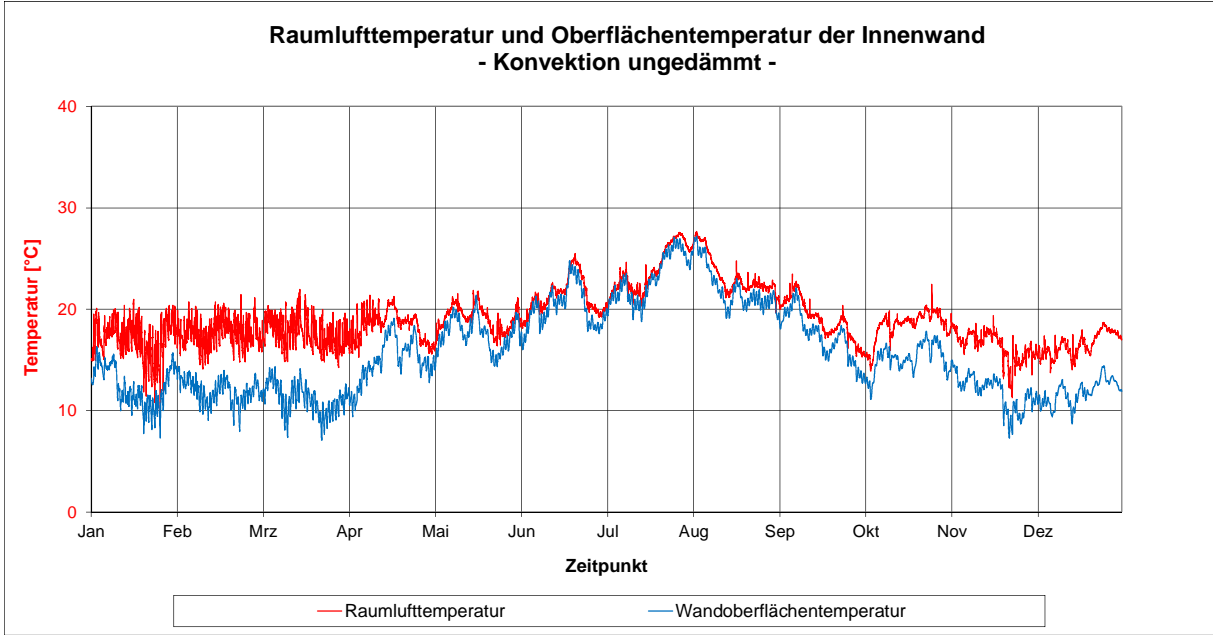


Abbildung 22 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumluft / raumseitige Oberflächentemperatur – Konvektion, ungedämmt*

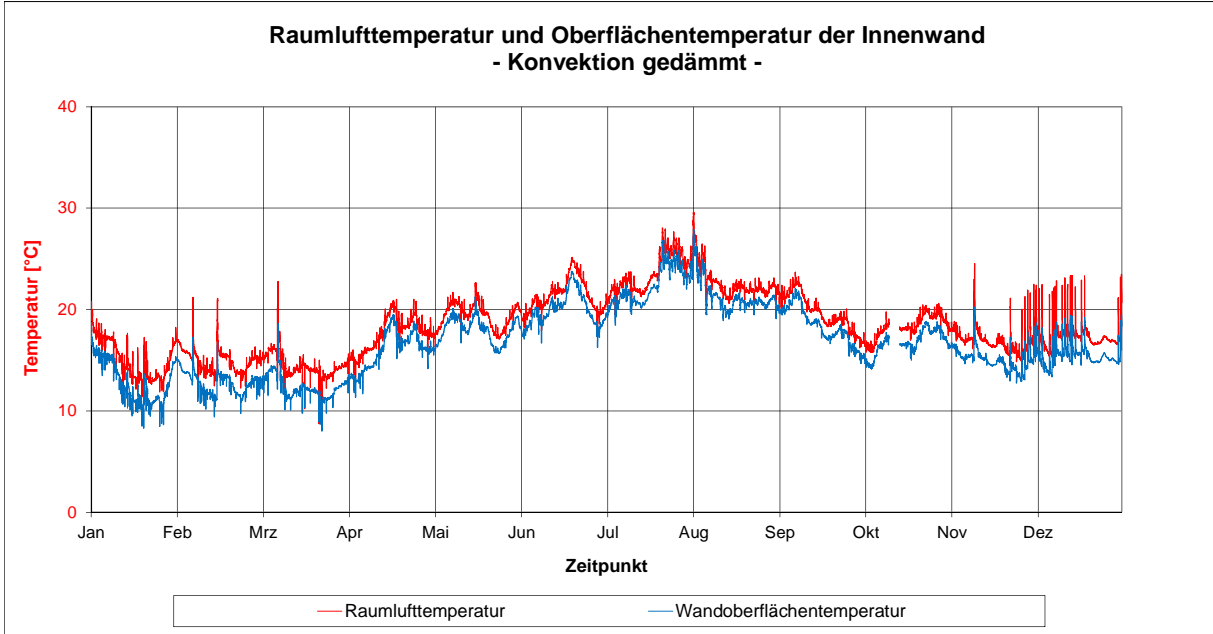


Abbildung 23 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumluft / raumseitige Oberflächentemperatur – Konvektion, gedämmt*

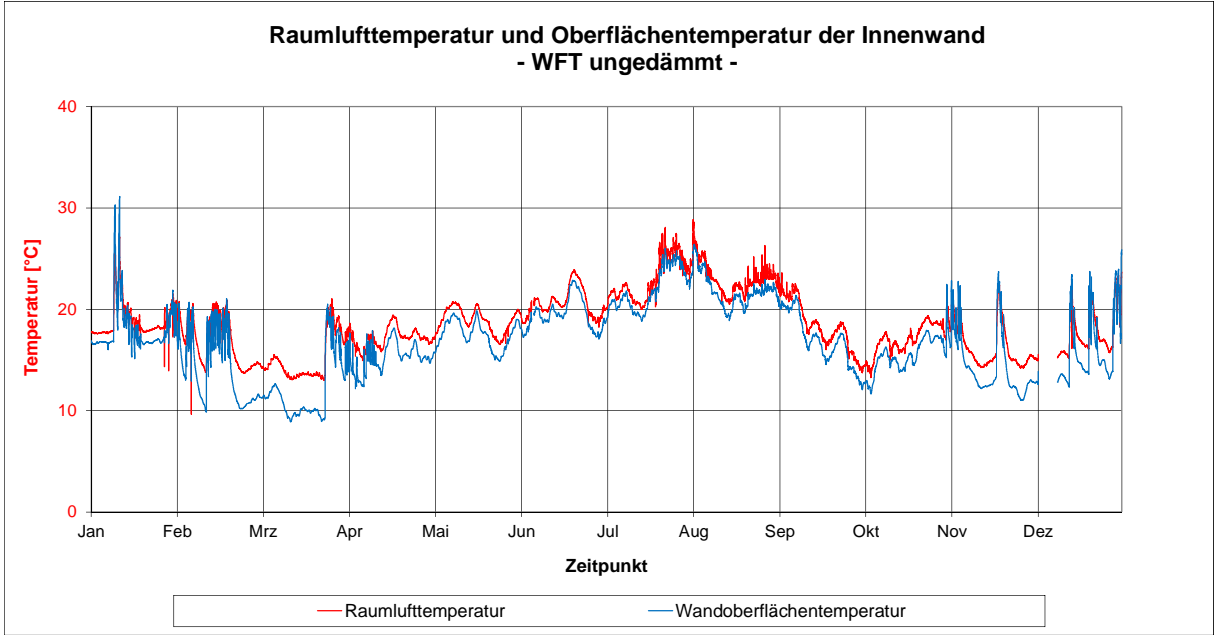


Abbildung 24 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumluft / raumseitige Oberflächentemperatur – Wandflächentemperierung, ungedämmt*

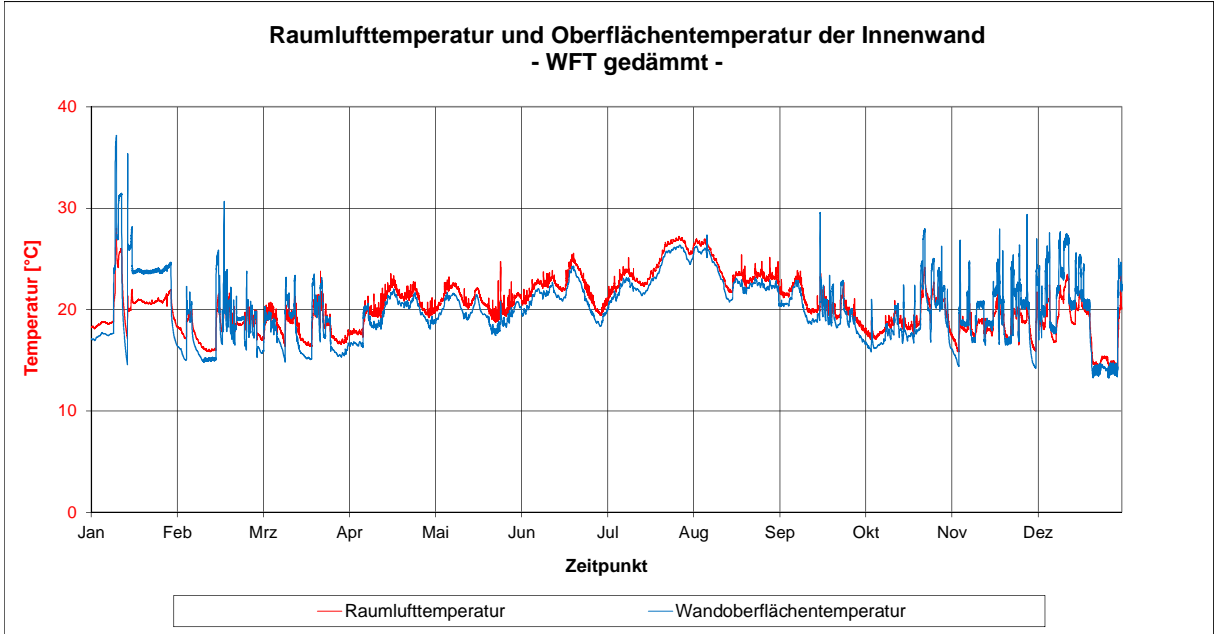


Abbildung 25 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumluft / raumseitige Oberflächentemperatur – Wandflächentemperierung, gedämmt*

Vor allem für die ungedämmte und konvektiv beheizte Variante wird deutlich, dass die Temperaturdifferenz im Winterfall häufig nur sehr gering ausfällt. Vor diesem Hintergrund ist diese Variante als kritisch zu bewerten.



In den Varianten, welche mit einer Wandflächentemperierung ausgerüstet sind, liegen die Oberflächentemperaturen der Wand im Regelfall stets über den Raumlufttemperaturen. Erfolgt die Heizung jedoch nur in geringem Maße, oder ist diese ausgeschaltet, kommt es relativ schnell zu Taupunktunterschreitungen (vgl. Abbildung 24 im Zeitraum Februar / März 2013). Um dauerhafte Schäden zu vermeiden, darf die Steuerung der WFT nicht vollständig dem Nutzer überlassen werden – d.h. die Wandoberflächentemperatur sollte stets so eingeregelt werden, dass sie oberhalb der Taupunkttemperatur der Raumluft liegt.

## 5.6 Ergänzende Daten des DWD

Da als Eingangsgröße für die Simulationsrechnungen wie auch zur Bewertung der Messergebnisse am Standort Veddel wurden weitere Daten vom Deutschen Wetterdienst übernommen. Die übermittelten Daten von der Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel (Luftlinienentfernung ca. 13 km) beinhalten die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die Windrichtung und –geschwindigkeit, die Niederschlagsmenge sowie die Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung (siehe folgende Abbildungen).

Die Strahlungskomponenten sowie die Wind- und Niederschlagsdaten wurden entsprechend plausibilisiert und als Klimadateien für die Verwendung im Simulationsmodell aufbereitet. Die Angaben des DWD zur Lufttemperatur und zur relativen Luftfeuchte wurden nur informativ betrachtet (Vergleich mit den am Standort Veddel erfassten Daten) – für die Simulationsrechnungen werden die direkt am Standort erfassten Daten verwendet, da diese die Situation vor Ort besser widerspiegeln.