

Sanierung von Gründerzeitkellern zu Wohnungen mit hoher Lebensqualität und minimalem Energieverbrauch

SPACE4free

P. Wegerer, S. Hinterseer,
T. Lewis, T. Bednar

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

7/2022

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Sanierung von Gründerzeitkellern zu Wohnungen mit hoher Lebensqualität und minimalem Energieverbrauch

SPACE4free

Dipl.-Ing. Paul Wegerer, Simon Hinterseer BSc,
Univ. Ass. Dipl.-Ing. Thomas Lewis,
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Bednar
Forschungsbereich Bauphysik,
E207 Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie

Dipl.-Ing. Paul Wegerer, BM Dipl.-Ing. Jürgen Brenner,
Ing. Robert Gassner
Gassner & Partner Baumanagement GmbH

Wien, Juni 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Kurzfassung | 10 |
| 2 | Abstract | 13 |
| 3 | Ausgangslage | 15 |
| 3.1. | Feuchtigkeit in Kellerbereichen – Stand der Technik/des Wissens | 16 |
| 3.1.1. | Erkenntnisse aus Vorprojekten..... | 16 |
| 3.1.2. | Bestehende nicht sanierte Kellerbereiche | 17 |
| 3.1.3. | Neue sanierte Kellerbereiche | 18 |
| 3.1.4. | Bauphysikalische Grundlagen und Risikoanalyse | 19 |
| 3.1.5. | Stand der aktuellen Normung | 22 |
| 3.2. | Sanierungskonzept Gassner & Partner | 23 |
| 3.3. | Schadensbeispiele aus der Praxis | 27 |
| 3.3.1. | Erdberührter Keller mit Büronutzung..... | 27 |
| 3.3.2. | Souterrainbüro mit sommerlicher Feuchteproblematik | 28 |
| 3.3.3. | Souterrainwohnung mit geringer Belegung und unzureichendem Luftwechsel..... | 30 |
| 3.3.4. | Erdgeschoßwohnung mit hoher Feuchtelast und kaltem Fußboden | 30 |
| 3.3.5. | Studenten-WG mit Einzelraumnutzung..... | 32 |
| 3.3.6. | Maisonettewohnung EG/KG | 33 |
| 3.4. | Forschungsfragen..... | 36 |
| 4 | Projektinhalt – Methodik | 37 |
| 4.1. | Energiebilanz – „space4free“ | 37 |
| 4.2. | Bestandserhebungen | 37 |
| 4.3. | Monitoring | 39 |
| 4.3.1. | Bauteil- und Raumklimamessungen | 39 |
| 4.3.2. | Lüftungsanlagenmonitoring | 41 |
| 4.3.3. | Datenspeicherung und Datenauswertung..... | 41 |
| 4.4. | Labormessungen..... | 42 |
| 4.4.1. | Betrachtete Materialien | 42 |
| 4.4.2. | Wesentliche Materialdaten für eine hygrothermische Simulation | 42 |
| 4.4.3. | Wassertransport über Diffusion | 43 |
| 4.4.4. | Wassertransport über Flüssigkeitsleitung (Kapillarleitung) | 43 |
| 4.4.5. | Versuch der Bestimmung von Materialparametern über „Curve Fitting“ | 43 |
| 4.4.6. | Aufsaugversuch – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten | 44 |
| 4.4.7. | Bestimmung der freien Wassersättigung | 45 |
| 4.4.8. | Trocknungsversuch..... | 45 |
| 4.5. | Analyse von Lüftungsstrategien..... | 46 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.5.1. | Anforderungen an die Lüftung | 46 |
| 4.5.2. | Mechanische Lüftung | 46 |
| 4.5.3. | Auslegung einer Lüftungsanlage bei Wohnungsnutzung | 47 |
| 4.5.4. | Feuchteintrag durch Lüftung vs. Sicherstellung der Hygiene..... | 47 |
| 4.5.5. | Minimierung des Luftwechsels ohne Beeinträchtigung der Lüftungsleistung | 48 |
| 4.5.6. | Typische Feuchtequellen | 49 |
| 4.5.7. | Obere Grenze für den Luftwechsel..... | 49 |
| 4.6. | Hygrothermische Simulation | 49 |
| 4.6.1. | Simulationsprogramm HAM4D_VIE | 50 |
| 4.6.2. | Geometrische Modellierung..... | 51 |
| 4.6.3. | Schimmel- und Verrottungsmodell nach Viitanen | 53 |
| 4.6.4. | Ermittlung von Feuchteemissionsprofilen..... | 59 |
| 4.6.5. | Randbedingungen..... | 61 |
| 5 | Ergebnisse | 68 |
| 5.1. | Sind die untersuchten Souterrain-/Gartenwohnungen „space4free“? | 68 |
| 5.2. | Mauerwerksuntersuchungen an Gebäuden | 72 |
| 5.2.1. | Mauerfeuchtemessungen am Gebäude Neilreichgasse 3-5..... | 72 |
| 5.2.2. | Mauerfeuchtemessungen am Gebäude Erlgasse 38..... | 76 |
| 5.2.3. | Rasterfeuchtemessungen | 79 |
| 5.3. | Monitoring | 82 |
| 5.3.1. | Klimamessungen in nicht sanierten Bestandskellern | 82 |
| 5.3.2. | Raumklimamessungen in Souterrain-/Gartenwohnungen | 83 |
| 5.3.3. | Bauteilmessungen zur Beurteilung des Schadensrisikos..... | 88 |
| 5.3.4. | Einfluss der Lüftungssteuerung „Intelligent Automatic“ (IA) | 96 |
| 5.4. | Messung der Feuchteemissionen der Bauteile..... | 99 |
| 5.5. | Materialdatenbestimmung..... | 101 |
| 5.5.1. | Versuche zu Mauerwerk und Putz..... | 101 |
| 5.5.2. | Messung der reinen Putzproben | 107 |
| 5.5.3. | Materialparameter für die Simulation | 108 |
| 5.6. | Intelligente Lüftungssteuerung..... | 108 |
| 5.7. | Hygrothermische Simulation | 111 |
| 5.7.1. | Jahresbilanzen | 111 |
| 5.7.2. | Monatliche Feuchtebilanz | 115 |
| 5.7.3. | Schimmelrisiko..... | 115 |
| 5.7.4. | Raumklima und Behaglichkeit | 118 |
| 5.7.5. | Effizienz der Entfeuchtungsstrategie..... | 120 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 124 |
| 6.1. | Kernaussagen des Projekts – Analyse der Forschungsfragen..... | 124 |

| | |
|---|------------|
| 6.2. Praxisrelevante Erkenntnisse des Projekts | 127 |
| 7 Ausblick und Empfehlungen | 131 |
| 7.1. Optimierung der Simulationsmethodik | 131 |
| 7.2. Weiterentwicklung des Lüftungsalgorithmus | 132 |
| 7.3. Umsetzung als Demonstrationsprojekt | 132 |
| 7.4. Weitere offene Forschungsthemen stichwortartig aufgelistet | 133 |
| 8 Verzeichnisse | 135 |
| 8.1. Literatur | 135 |
| 8.2. Normen | 138 |
| 8.3. Abbildungsverzeichnis | 139 |
| 8.4. Tabellenverzeichnis | 146 |
| 9 Anhang | 147 |
| 9.1. Data Management Plan (DMP) | 147 |
| 9.1.1. Datenerstellung und Dokumentation | 147 |
| 9.1.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte | 147 |
| 9.1.3. Datenspeicherung und -erhalt | 147 |
| 9.1.4. Wiederverwendbarkeit der Daten | 148 |
| 9.2. Detailangaben zum halbsynthetischen Außenklima | 149 |
| 9.3. Mauerfeuchtemessungen – weitere Diagramme | 150 |
| 9.4. Detaillerggebnisse der Raumklimamessungen | 151 |
| 9.5. Materialdaten | 159 |

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Der Titel des Forschungsprojekts „space4free“ entstand aus der Überlegung, leerstehende, ungenutzte Kellerbereiche in Gründerzeithäusern als Wohnraum auszubauen und somit die innerstädtische Nachverdichtung zu verstärken. Dies sollte unter dem Aspekt der Effizienzsteigerung ohne eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs (HWB) des Bestandsgebäudes möglich sein, wenn der HWB der neu entstehenden Wohnungen annähernd gleich oder geringer ist als die ursprünglichen Wärmeverluste durch die unkonditionierten Kellerbereiche. Die primäre Forschungsfrage lautet somit: Übersteigen die Wärmeverluste zum Kellergeschoß im Originalbestand den tatsächlichen Heizwärmebedarf einer sanierten Souterrain-/Gartenwohnung?

Neben dem energetischen Motiv standen die bauphysikalische Planbarkeit und die praxisnahe Ausführbarkeit im Vordergrund des Projekts. Das Schadensrisiko in den sanierten Souterrainwohnungen sollte dauerhaft gering sein, auch wenn das Nutzer:innen-Verhalten und die Feuchtebelastung der Bauteile große Unsicherheitsfaktoren darstellen. Die weiteren Forschungsfragen betreffen die Einflüsse des Nutzer:innen-Verhaltens und der Bauteile in Bezug auf Feuchteeintrag, Außenklima und Luftwechsel. Weiters sollte die Zuverlässigkeit hygrothermischer Simulationen und die Wirksamkeit eines intelligenten Lüftungsalgorithmus in Bezug auf Planbarkeit und Schadensrisiko feuchtebelasteter Souterrainwohnungen analysiert werden.

Ausgangssituation/Status quo

Die Gassner & Partner Baumanagement GmbH saniert und revitalisiert seit ca. 20 Jahren desolate Gründerzeithäuser zu modernen Gebäuden mit typischem Altbauflair und höchstem Wohnstandard. Zeitgemäße Architektur trifft dabei gründerzeitliche Stilelemente, eine Haustechnik nach dem neuesten Stand des Wissens garantiert hohe Energieeffizienz und innovative Sanierungsmethoden gewährleisten ein geringes Schadensrisiko. Neben dem Dachgeschoßausbau leistet der Umbau ungenutzter Kellerbereiche zu Wohnungen mit hoher Lebensqualität einen erheblichen Beitrag zur innerstädtischen Nachverdichtung. Mitten in der Stadt entstehen hocheffiziente Souterrain-/Gartenwohnungen, die im Sommer kühl bleiben und mit ihren hofseitigen Terrassen und Balkonen zur Vermeidung von Hitzeinseln beitragen.

Aus bauphysikalischer Sicht bestehen in der Sanierungsplanung ungenutzter Kellerbereiche einige ungelöste Fragestellungen, die vor allem die Feuchteproblematik und das individuelle Nutzer:innen-Verhalten betreffen. Eine Berechnung oder Simulation war bislang nicht möglich. Die normativen Vorgaben sind bei erdanliegenden Bauteilen oft nicht umsetzbar und schränken die Nutzbarkeit ein. Oftmals bleiben Kellerbereiche aufgrund von Mauerfeuchte, Salzausblühungen und mangelnder Belüftung muffig und ungenutzt. Vorhandene Strategien zur Kellerbelüftung haben keine Erfordernisse in Bezug auf Hygiene und sind daher nicht für Wohnbereiche geeignet.

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Basierend auf den primären Forschungsfragen bestand das Ziel, den Energiebedarf der sanierten Souterrain-/Gartenwohnungen auf den Wert der Wärmeverluste durch den ursprünglichen ungenutzten Keller zu beschränken. Außerdem sollte ein intelligenter Lüftungsalgorithmus entwickelt werden, der sowohl eine feuchteabhängige Steuerung als auch eine Nutzer:innen-spezifische Regelung

in Bezug auf Anwesenheit, Hygiene und Komfort sicherstellt. Die Feuchtelasten wurden aus Bestandsuntersuchungen und realen Raumklimamessungen ermittelt. Fehlende Daten oder Randbedingungen wurden durch plausible Annahmen und Literaturquellen ergänzt. Mittels Bauteilsimulationen wurde der intelligente Lüftungsalgorithmus einem „proof of concept“ unterzogen. Weiters wurden langfristige Raumklimamessungen durchgeführt, die auch nach dem Projektende im Zuge der laufenden Qualitätssicherung weitergeführt werden. Ein wesentlicher Projektbestandteil ist die Beurteilung des Schadensrisikos von erdanliegenden Konstruktionen. Dieses wurde im Zuge von Mauerwerksuntersuchungen und langfristigen Bauteilmonitorings untersucht.

Methodische Vorgehensweise

Die Projektergebnisse wurden im Wesentlichen durch Messungen bzw. Bauteilversuche und/oder hygrothermische Simulationen erzielt. Zu Beginn des Projekts wurden Bestandserhebungen und Materialuntersuchungen im Labor durchgeführt. Dabei wurden wesentliche Eingangsparameter für die hygrothermischen Bauteilsimulationen generiert. In der zweiten Projekthälfte wurde mittels Simulation in einer Variantenstudie die Wirksamkeit bestimmter Lüftungsstrategien unter Berücksichtigung der ermittelten Materialparameter und der angenommenen Randbedingungen untersucht. Begleitend dazu lieferten mehrere Raumklimamonitorings reale Nutzungsdaten. Die Simulationsergebnisse wurden teilweise mit den Monitoringdaten verglichen, um Rückschlüsse auf die Qualität der Simulationsergebnisse und auf die Funktionstüchtigkeit der realen Lüftungssteuerungen ziehen zu können. Der Energiebedarf sanierter Souterrainwohnungen wurde aus realen Verbrauchsdaten in vier ausgewählten Objekten von Gassner & Partner erhoben. Diese Daten wurden mit Simulationsergebnissen eines ungenutzten und natürlich belüfteten Kellers verglichen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Bandbreite realer Wärmeverbrauchsdaten von vier sanierten Souterrain-/Gartenwohnungen von Gassner & Partner ist annähernd gleich groß wie die Bandbreite der simulierten Wärmeverluste durch die Kellerdecke eines unsanierten Bestandsobjekts. Dieses Ergebnis belegt die Forschungshypothese, dass in ungenutzten Kellerbereichen zusätzliche Wohnflächen geschaffen werden können, ohne den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes zu erhöhen. Die hygrothermischen Simulationen unter Berücksichtigung der intelligenten Lüftungssteuerung zeigen, dass das Nutzer:innen-Verhalten in der Regel die maßgebliche Größe für die Feuchtebilanzierung darstellt. Gleichzeitig stellt sich heraus, dass die Emissionen aus den Bauteilen zwar plausibel messbar sind, jedoch mittels hygrothermischer Simulation nur in der Größenordnung reproduzierbar berechenbar sind. Die Materialmodelle, speziell in Bezug auf Flüssigkeitsleitung und Feuchtepufferung, sowie die dreidimensionale Modellierung von Raumgeometrien erfordern weitere Forschungsarbeiten.

Sowohl die Daten der Raumklimamessungen als auch die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass das Raumklima in den Souterrain-/Gartenwohnungen einer typischen Wohnungsnutzung entsprechen kann. Bei zwei der acht im Langzeitmonitoring untersuchten Wohnungen konnte infolge einer übermäßigen Anfeuchtung der Raumluft jedoch ein erhöhtes Risiko für Schimmelpilzbildung festgestellt werden. Die Ergebnisse ausgewählter Bauteilmessungen im Fußbodenaufbau von Souterrain-/Gartenwohnungen zeigen ein erhöhtes Schadensrisiko lediglich im Boden-Wand-Anschlussbereich. Unter speziellen Randbedingungen ist die Aktivierung der Fußbodenheizung während der Übergangszeit im Frühjahr erforderlich.

Ausblick

Die Monitoringmaßnahmen werden auch nach dem Projektende fortgeführt, um die Langzeitwirkung bestimmter Maßnahmen erfassen zu können. Die Publikation von Ergebnissen aus diesem Monitoring in Fachzeitschriften und im Zuge von Kongressen ist geplant.

Die entwickelte intelligente Lüftungssteuerung wird weiter überarbeitet werden. Während in der ersten Version die Regelung anhand von Schwellenwerten erfolgt, sollen in einer Überarbeitung Rampen und gleitende Mittelwerte sowie Schalthysteresen in den Algorithmus implementiert werden. Ein fernes Ziel könnte darüber hinaus die Einbindung von Wettervorhersagen sein.

Um die gewonnenen Erkenntnisse für Planer:innen verständlicher zu gestalten, könnte ein Planungsleitfaden für Souterrain-/Gartenwohnungen mit Bezug auf alle Randbedingungen sowie die Berechnungsparameter hilfreich sein. Ein praxisnahes und leistungsstarkes Simulationstool könnte ebenfalls für die Planung relevant sein.

2 Abstract

Motivation and research question

The title of the research project "space4free" arose from the idea of converting unused basement areas in Vienna's historic building stock into living space and thus allowing urban densification. In accordance with the paradigm of increasing energy efficiency, this should be possible without an increase in heating energy of the existing building, if the consumption of the newly created apartments is approximately equal to or less than the original heat losses through the unconditioned basement areas. Therefore, the primary research question is: Do the heat losses to the basement in an unrenovated building exceed the actual heating requirement of a refurbished basement / garden apartment?

Initial situation/status quo

Gassner & Partner Baumanagement GmbH has been renovating and revitalizing desolate houses, that were constructed during the "Gründerzeit" (late 19th and early 20th century), into modern buildings combining the historical flair with the highest standard of living for around 20 years. Contemporary architecture meets Wilhelminian style elements, while state-of-the-art building technology guarantees modern energy efficiency and innovative renovation methods guarantee a low risk of damage. In addition to attic extension, the conversion of unused basement areas into apartments with a high quality of life makes a significant contribution to urban densification. Highly efficient sub street level / garden apartments are being built in the city, which are resilient against summer overheating, and with their courtyard-facing terraces and balconies, help avoid urban heat-islands.

From a building physics point of view, there are some unsolved questions in the renovation planning of unused basement areas, most notably concerning the problem of moisture and individual user behaviour. A calculation or simulation has not yet been possible. The normative specifications are often not feasible for underground building components and limit usability. Often, basement areas remain musty and unused due to wall dampness, salt efflorescence and insufficient ventilation.

Existing strategies for basement level ventilation are not fit to be applied to apartment usage due to a lack in hygiene requirements.

Project contents and objectives

Based on the two primary research questions, the aim was to limit the energy requirements of the refurbished sub street level / garden apartments to the value of the heat losses to the originally unused basement. In addition, an intelligent ventilation algorithm should be developed, that ensures both humidity-dependent control and user-specific regulation with regard to presence, hygiene and comfort. The moisture loads were determined from existing studies and real room climate measurements. Missing data or boundary conditions were supplemented by plausible assumptions and literature sources. The intelligent ventilation algorithm was subjected to a "proof of concept" by means of component simulations. Furthermore, long-term indoor climate measurements were carried out, which will be continued after the end of the project as part of ongoing quality assurance. An essential part of the project is the assessment of the risk of damage to building components with ground-contact. This was examined in the course of masonry examinations and long-term component monitoring.

Methodical procedure

The project results were mainly achieved through measurements and component tests and / or hygrothermal simulations. At the beginning of the project, material tests were carried out in the laboratory. This generated essential input parameters for the hygrothermal component simulations. In the second half of the project, the effectiveness of certain ventilation strategies was investigated by means of simulation, taking into account the determined material parameters and the assumed boundary conditions. In addition, several room climate monitors provided data on the actual usage of the apartments. The simulation results were partially compared with the monitoring data to allow conclusions about the quality of the simulation results and the functionality of the actual ventilation controls. The energy requirements of refurbished basement apartments were collected from actual consumption data in four selected buildings by Gassner & Partner. This data was compared with simulation results of an unused and naturally ventilated cellar.

Results and conclusions

The range of measured heat consumption of four renovated basement / garden apartments from Gassner & Partner is almost the same as the range of simulated heat losses through the basement ceiling of an unrenovated existing building. This result confirms the research hypothesis that additional living space can be created in unused basement areas without increasing the heating requirements of the existing building. The hygrothermal simulations, taking into account the intelligent ventilation control, show that user behaviour is usually the decisive factor for the moisture balance. At the same time, it turns out that the emissions from the components can be plausibly measured, but only the order of magnitude can be reproduced by hygrothermal simulation. The material models, especially with regard to liquid water conduction and moisture buffering, as well as the three-dimensional modelling of spatial geometries require further research.

Both the data of the indoor climate measurements and the results of the simulations show, that the indoor climate in the basement / garden apartments can correspond to a typical apartment use. In two of the eight apartments examined in long-term monitoring, however, an increased risk of mould formation was found due to high humidity of the room air. The results of selected component measurements in the floor structure of basement / garden apartments show an increased risk of damage only in the floor-wall connection area. Under special conditions, the activation of the underfloor heating is necessary during the transition period in spring.

Outlook

The monitoring measures will be continued after the end of the project in order to be able to record the long-term effects of certain measures. Publication of the results of this monitoring in scientific journals and congresses is planned.

The intelligent ventilation control that has been developed will be further revised. While in the first version the control is based on threshold values, ramps and moving average values as well as switching hystereses are to be implemented in the algorithm in a revision. Furthermore, a distant goal could be the inclusion of weather forecasts.

In order to make the knowledge gained more understandable for planners, a planning guide for basement / garden apartments with reference to all boundary conditions and the calculation parameters could be helpful. A practical and powerful simulation tool could also be relevant for planning.

3 Ausgangslage

Die Steigerung der Energieeffizienz von Bestandsgebäuden erlangte in den letzten Jahren immer größere Bedeutung und zählt mittlerweile zu den wichtigsten Forschungsschwerpunkten in der universitären und in der praxisorientierten Bauforschung. Bei der thermischen Sanierung eines typischen Gründerzeithauses können verschiedenste Maßnahmen gesetzt werden. In den meisten Fällen kommt es zu einer thermischen Verbesserung der Kellerdecke, wenngleich der Keller als Ganzes sehr selten saniert wird und oftmals ungenutzt bleibt.

Unter dem Aspekt der Effizienzsteigerung und der Ressourcenschonung ist es dennoch sinnvoll, derzeit ungenutzte Erdgeschoßzonen und Kellerbereiche als Wohnraum auszubauen und so eine innerstädtische Nachverdichtung zu forcieren. Am Beispiel des Wiener Gebäudebestands wird das Potential der Souterrainsanierungen sichtbar. Ungefähr ein Fünftel des Wiener Gebäudebestands wurde vor 1919 errichtet. Etwa ein Viertel davon entspricht klassischen Gründerzeithäusern mit sanierbaren Souterrainbereichen, wodurch etwa 16.000 Wohneinheiten entstehen könnten. [WIE 15]

KARTOGRAPHISCHE INFORMATIONEN IM ÜBERBLICK BAUPERIODE

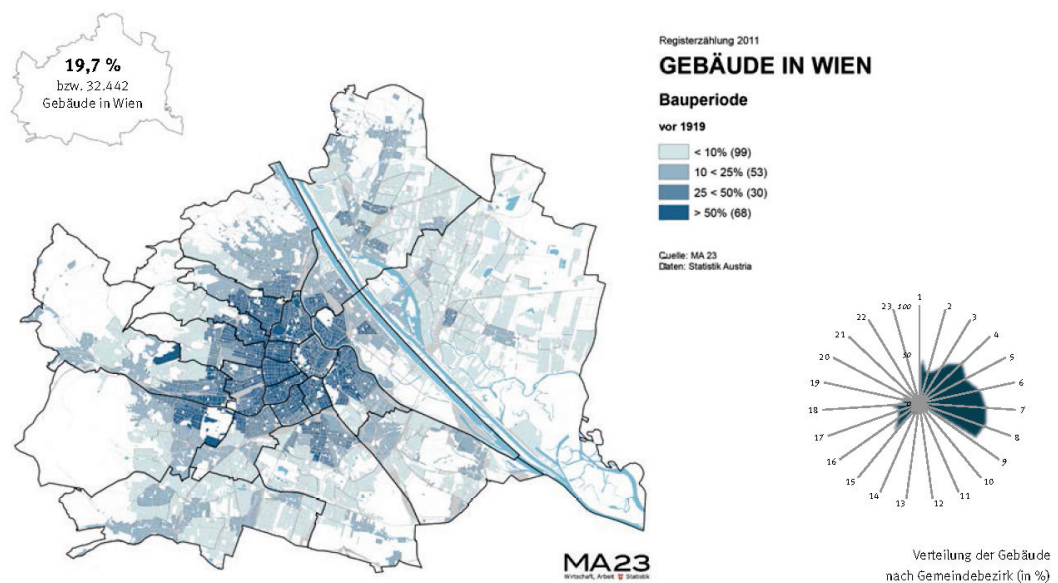


Abbildung 1: Gebäudebestand in Wien der Bauperiode vor 1919 aus dem Statistik Journal 2015 der Stadt Wien [WIE 15]

Bei typischen Gründerzeithäusern mit Hochparterre liegt der Keller nur teilweise im Erdreich, wodurch eine gute Belichtung und somit eine Wohnungsnutzung möglich ist. Die wenigen Beispiele mit nachweislich schadensfreien Wohnbereichen basieren allerdings auf optimalen Gegebenheiten bezüglich Bausubstanz und Beschaffenheit des Gründerzeithauses. In vielen Fällen sind solche Wohnungen jedoch von Schimmelproblemen und unhygienischen Zuständen betroffen und weisen nur einen geringen Wohnstandard auf. Aufsteigende Mauerfeuchte und Salzausblühungen machen eine dauerhafte Wohnungsnutzung vielerorts unmöglich. In diesen Fällen kann eine gezielte Mauerwerkstrochenlegung Abhilfe schaffen. Der Stand der Technik bzw. die aktuelle Normung sehen

dafür verschiedene Maßnahmen vor, die vom Durchschneiden der Wände und Einrammen einer kapillarbrechenden Schicht bis hin zu bituminösen Wandanstrichen zur Vermeidung von Salzausblühungen reichen. Sogenannte Sanierputze oder Opferputze können vielfach nur in Lagerkellern oder ungenutzten Bereichen verwendet werden, da die Wartungsintervalle – das Erneuern des Putzes – für eine Wohnungsnutzung zu kurz sind. Eine weitere Maßnahme, um die Feuchteproblematik in Kellerbereichen in den Griff zu bekommen, ist eine gezielte Be- und Entlüftung der Räume. Dabei spielt die Feuchtebilanz und damit zusammenhängend auch die Raumlufttemperatur des Kellerbereichs eine wesentliche Rolle. Praxisbeispiele zeigen, dass eine feuchtegeregelte Lüftungsanlage das Schadenspotential in Kellerbereichen deutlich verringern kann.

Nicht sanierte Gründerzeitkeller weisen in der Regel eine unkontrollierte bzw. durch Druckunterschiede induzierte Durchströmung auf. Dies führt dazu, dass Kellerbereiche während der Wintermonate stark auskühlen und dadurch die Transmissionswärmeverluste durch die Kellerdecke deutlich ansteigen.

3.1. Feuchtigkeit in Kellerbereichen – Stand der Technik/des Wissens

3.1.1. Erkenntnisse aus Vorprojekten

Die Grundlagen der energieeffizienten Kellersanierung wurden bereits unter anderem im Passivhaus-Bauteilkatalog Sanierung [ZEL 17] eingehend beschrieben. Dabei wurde das Schadensrisiko infolge aufsteigender Mauerfeuchte und sommerlicher Kondensation bei unterschiedlichen Sanierungsvarianten diskutiert. Mittels hygrothermischer Simulationen wurde gezeigt, welchen Einfluss die natürliche Kellerdurchlüftung im Unterschied zu einer kontrollierten mechanischen Kellerbe- und -entlüftung hat. Weiters wurde deutlich gemacht, wie die nachträgliche thermische Sanierung eines nassen Kellerbauteils den Feuchtehorizont anheben kann, wenn keine Begleitmaßnahmen wie der Einbau einer kapillarbrechenden Schicht oder die Installation einer mechanischen Lüftungsanlage vorgesehen werden. Weiters wurde auf die Nutzungsänderung von Lagerkeller oder „Nicht-Nutzung“ auf Wohnungsnutzung eingegangen. Dabei standen der Einfluss von Raumlufttemperierung und Feuchteinträgen sowie die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung und somit der Energieeffizienzsteigerung im Vordergrund.

Im Rahmen des Förderprogramms „Haus der Zukunft“ entstanden einige Demonstrationsgebäude, bei denen auch unterschiedliche Maßnahmen zur Kellersanierung erprobt wurden. Das Projekt „Wissgrillgasse 10“ [WIS 10] ist ein Gebäude, das von Ulreich Bauträger bzw. Gassner & Partner saniert wurde. Es war eines der ersten Objekte von Ulreich Bauträger, in dem die ungenutzten Kellerflächen zu 100% verwertet wurden. Das Konzept der feuchtegesteuerten Kellerlüftung für Lagerkeller wurde dort erstmals, wenngleich in deutlich einfacherer Ausführung als bei heutigen Anlagen, getestet. Ein weiteres Projekt, „Sanierung Gründerzeitgebäude Eberlgasse auf Passivhausstandard“ [EBE 15], beleuchtet primär die Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei einem Gründerzeithaus. Die Kellersanierung war eine wesentliche Begleitmaßnahme, da die Kellerdecke gedämmt und der Kellerraum außerhalb der thermischen Hülle belassen wurde. Mittels Kragendämmung an den Kellerwänden wurde versucht, die Wärmebrücken zu minimieren. Diese Vorgangsweise unterscheidet sich von der Sanierungsstrategie von Gassner & Partner (siehe 3.2) und den hier vorgestellten Maßnahmen, vor allem im Ausbaustandard der Kellerräumlichkeiten.

Das Förderprogramm „Energy Conservation in Buildings“, speziell das Projekt „IEA Annex 55 – Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting, Probability Assessment of Performance & Cost“ [IEA 15], generierte wesentliches Basiswissen für die Auswertung der Messergebnisse und für die weiteren Überlegungen im Projekt „space4free“. Der IEA Annex 55 befasste sich mit der Fragestellung, welche Art der thermischen Sanierung eines Gebäudes die höchste Energieeinsparung beim geringstmöglichen Schadensrisiko erzielt. Die entwickelten Werkzeuge basieren auf probabilistischen Methoden und liefern Erwartungswerte einschließlich Standardabweichungen für den Energieverbrauch, das Versagensrisiko und die Lebenszykluskosten. Diese Erkenntnisse können auf das Feuchtmanagement umgelegt werden und in den entwickelten Simulationsprogrammen Anwendung finden. Das hygrothermische Simulationsprogramm HAM4D_VIE wurde bereits im Zuge des IEA Annex 55, sowie auch beim aktuellen Projekt „space4free“ weiterentwickelt. Vor allem die Materialdateneingabe und die Ausgabe von Variantenstudien war für „space4free“ von Nutzen.

3.1.2. Bestehende nicht sanierte Kellerbereiche

Kellerbereiche in typischen Gründerzeithäusern wurden über die Zeit hinweg verschieden genutzt. Neben Stallungen und Kohlenkellern waren dort oftmals Lagerräume für Lebensmittel untergebracht. Aufgrund der großen Speichermasse der Kellerböden und massiven Wände konnten vielerorts verschiedene Güter sogar über den Sommer kühl gelagert werden. Später wurden straßenseitige Kellerlokale von Handwerkern und Händlern genutzt. Weiters schützte der Keller die meist im Hochparterre liegenden Wohnbereiche vor aufsteigender Feuchtigkeit. Bis in die Nachkriegszeit wurden die Kellerwände aus Natursteinen oder Vollziegeln hergestellt. Die Böden wurden entweder mit Stampflehm ausgeführt oder mit Ziegelplatten ausgelegt. Alle genannten Materialien verfügen in der Regel über eine starke kapillare Leitfähigkeit. Dies führt in Kombination mit fehlenden Abdichtungen und erdanliegenden Bauteilen zu einem durchwegs feuchten Kellerklima.

Ein weiteres Merkmal herkömmlicher Gründerzeitkeller ist die meist unkontrollierte Durchlüftung der Räume. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl typischer Kellerfenster und Lüftungsöffnungen von Gründerzeithäusern. Die Fenster sind oft direkt über dem Gehsteigniveau angeordnet und wurden vorwiegend als Zierelemente eingesetzt. Es bestehen auch öffnenbare und regulierbare Lüftungsöffnungen, die vor allem während der Sommermonate eine Befeuchtung bzw. Erwärmung der Kellerraumluft verhindern sollen.



Abbildung 2: Fensteröffnung eines originalen, nicht sanierten Gründerzeitkellers (links);
Fenstergitter mit Verschlussmöglichkeit (rechts)

Aufgrund der oben beschriebenen Gegebenheiten sind nicht sanierte Kellerbereiche heute als Lagerkeller oft nicht nutzbar. Vor allem in früher als Stallungen genutzten Kellern besteht eine hohe Salzbelastung des Mauerwerks, die zu Ausblühungen an Wandoberflächen führt. Lehm- und Ziegelböden sind meist feucht und können nicht als Lagerfläche genutzt werden. Die aufsteigende Mauerfeuchte sowie die unkontrollierte Durchlüftung in der warmen Jahreszeit führen zu einer hohen Raumluftheuchte, die Schimmelpilzbildung an sämtlichen Oberflächen von Lagergütern oder Bauteilen verursacht. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft ungenutzte Kellerbereiche, die einerseits zu einem Leerstand führen und andererseits das restliche Gebäude durch muffigen Geruch und unhygienische Zustände negativ beeinflussen.



Abbildung 3: Massive Salzausblühungen bei unsaniertem Mauerwerk (links); nicht genutzter Keller mit unverputzten Ziegelwänden (rechts)

Die sozioökonomischen Aspekte ungenutzter leerstehender Keller- und Erdgeschoßzonen wurden im Projekt „Urban Parterre Vienna“ [PSE 21] beschrieben. Die Erkenntnisse knüpfen an die eingangs erwähnte Wohnungsknappheit an und unterstreichen die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und innerstädtischen Nachverdichtung in gründerzeitlich bebauten Stadtgebieten.

3.1.3. Neue sanierte Kellerbereiche

Um einen typischen Keller eines Gründerzeithauses nutzbar zu machen und um darin Güter wie beispielsweise Karton, Textilien oder Holzmöbel lagern zu können, muss neben der Sanierung der Bauteiloberflächen vor allem das Raumklima verbessert werden. Dies erfordert meist eine Trockenlegung der Bauteile oder zumindest der Bauteiloberflächen, die Herstellung eines tragfähigen trockenen Bodens sowie eine kontrollierte Be- und Entlüftung der Kellerräume. Die folgenden beiden Fotos in Abbildung 4 zeigen beispielhaft den sanierten Keller des Gründerzeithauses Leystraße 81. Es ist erkennbar, dass der Gewölbekeller vollständig entkernt und mit neuen Kellerabteilen ausgestattet wurde. Der Fußboden besteht aus einer massiven Betonplatte, die aus statischen Gründen errichtet wurde und gleichzeitig eine Abdichtung gegen aufsteigende Feuchte aus dem Boden darstellt. Die Wandoberflächen wurden mit einem Feuchtmauerputz patschokiert.



Abbildung 4: Sanierter Lagerkeller am Beispiel des Objekts Leystraße 81

Bereits bei der Sanierungsplanung muss unterschieden werden, ob eine Nutzung als Lagerkeller oder als Wohn- bzw. Büroraum beabsichtigt ist. In großflächigen Lagerkellern mit abgetrennten Kellerabteilen ist eine lockere, durchströmbare Konstruktion aus Metallgitterwänden vorteilhaft. Dadurch kann sich die Raumluftfeuchte gleichmäßig verteilen und stehende Totluftzonen werden vermieden. Dies hängt auch stark von den Lagergütern ab. Vollgestopfte Kellerabteile mit gestapelten Kartonagen bis unter die Kellerdecke führen oft zu einer schlechten Belüftung der Wandoberflächen und erhöhen das Risiko für einen Feuchteschaden.

Während in Lagerkellern die thermische Performance eher untergeordnet ist, spielt diese bei einer Souterrainwohnung eine deutlich größere Rolle. Dies betrifft die Transmissionswärmeverluste der einzelnen Bauteile, aber vor allem auch die Lüftungswärmeverluste durch die kontrollierte Be- und Entlüftung. Das Sanierungskonzept von Gassner & Partner wird anhand eines realen Beispiels in Abschnitt 3.2 vorgestellt.

3.1.4. Bauphysikalische Grundlagen und Risikoanalyse

Wenn von feuchtebelasteten Kellern die Rede ist, können meist zwei verschiedene Ursachen für die Herkunft der Feuchtigkeit festgestellt werden:

- Aufsteigende Feuchtigkeit tritt aus dem Boden in das Mauerwerk über und wird durch saugende Materialien wie Ziegel, Lehm, Verputz und dergleichen kapillar weitergeleitet. Je nach Wasserdruck bzw. Saugspannung im Material steigt die Feuchtigkeit im Mauerwerk bis zu mehreren Metern hoch auf.
- Kondensation an Bauteilen tritt dann auf, wenn feuchtwarme Außenluft in den Keller eindringt und an Bauteiloberflächen, die unter der Taupunkttemperatur liegen, vorbeistreicht. In der Regel kommt es bei stark saugenden Materialien wie Ziegel zu einer Feuchtepufferung und je nach Feuchtegradient im Bauteil auch zu einer Weiterleitung der Feuchtigkeit. Dies kann vor allem während der Sommermonate zu einer Anfeuchtung und im Winter zu einer Austrocknung des Mauerwerks führen.

In ungenutzten Lagerkeller von Gründerzeithäusern herrscht sehr oft ein muffiges und feuchtes Raumklima vor. Je nach Durchströmung des Kellers und Beschaffenheit des Bodens treten beide oben

beschriebenen Möglichkeiten der Feuchteanreicherung auf. Eine starke Querdurchlüftung führt zu beträchtlichen Lüftungswärmeverlusten, die ein Auskühlen des Kellers und ein massives Abkühlen der Bauteile zur Folge haben kann. Kalte Kellerdecken mindern die Oberflächentemperaturen in Erdgeschoßbereichen und erhöhen die Transmissionswärmeverluste durch die Kellerdecke. Aufgrund der Speichermassen entsteht eine Phasenverschiebung zwischen den Temperaturen der Bauteile und der Außenklimabedingungen. Dies ist im Abschnitt 4.6.5 genauer beschrieben. Die Auswirkungen aufsteigender Feuchtigkeit wurden anhand von Bauteilmessungen und Bestandserhebungen mittels Bohrmehluntersuchungen analysiert. Diese Ergebnisse sind in Abschnitt 5.2 vorgestellt.

Ein wesentlicher Punkt zum Verständnis der Feuchteproblematik in Kellerbereichen ist der Zusammenhang zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Physikalisch wird zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent des Sättigungsdampfdrucks und der absoluten Luftfeuchtigkeit in g/m^3 unterschieden. Da der Sättigungsdampfdruck bzw. der Wasserdampfpartialdruck von der Temperatur abhängig sind, ist auch die relative Luftfeuchtigkeit von der Temperatur abhängig. Dabei gilt: umso wärmer die Luft ist, desto mehr Wasser kann diese aufnehmen. Somit ist es nicht sinnvoll, die relative Luftfeuchtigkeit als Vergleichswert bei der Regelung einer Lüftungsanlage heranzuziehen. Zum Vergleich der Luftfeuchte des Außen- und Innenklimas ist als Regelgröße ausschließlich die absolute Luftfeuchte zielführend. Diese gibt den Wassergehalt pro Luftvolumen an und ist unabhängig von der vorherrschenden Temperatur. Die folgenden Diagramme zeigen das gemessene Raumklima und das gemessene Außenklima am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019. Die Skalierung aller Diagramme ist gleich groß, wodurch diese direkt miteinander vergleichbar sind. Dadurch werden die Unterschiede zwischen relativer und absoluter Luftfeuchtigkeit sichtbar. Anhand der Tages- und der gleitenden Wochenmittelwerte sind die unterschiedlichen Schwankungen des Klimas im Innenraum und im Außenbereich erkennbar. Für die Regelung einer Lüftungsanlage sind vor allem jene Zeitabschnitte von Interesse, in denen die absolute Außenluftfeuchte die absolute Raumlufteuchte überschreitet.

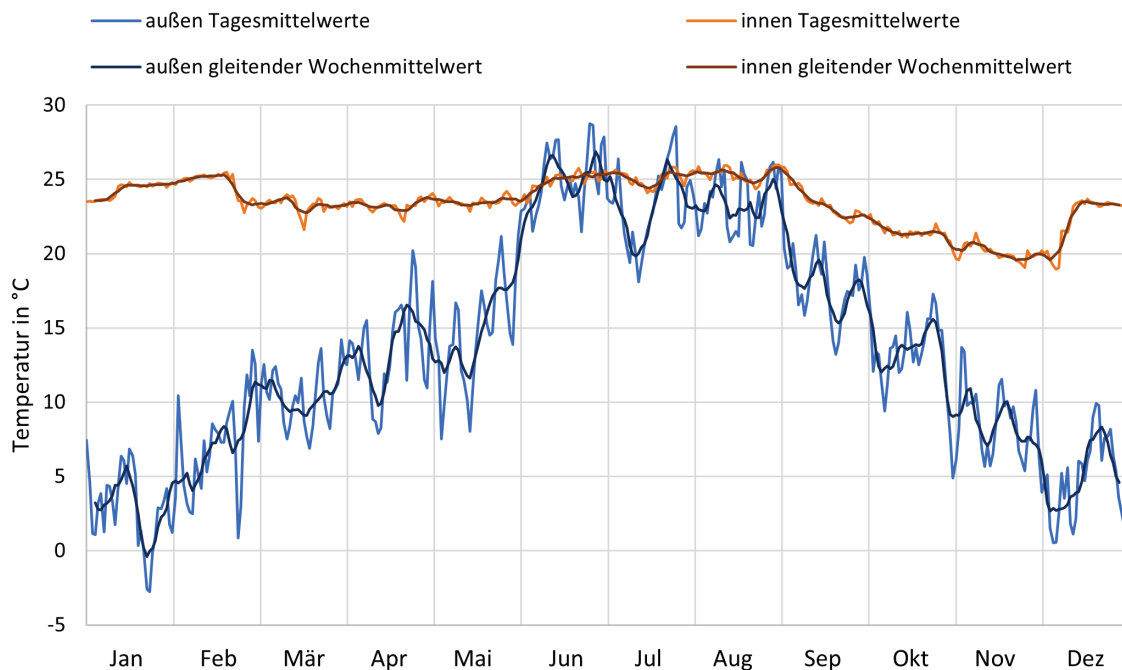


Abbildung 5: Gemessene Außen- und Raumlufteperatur am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt;

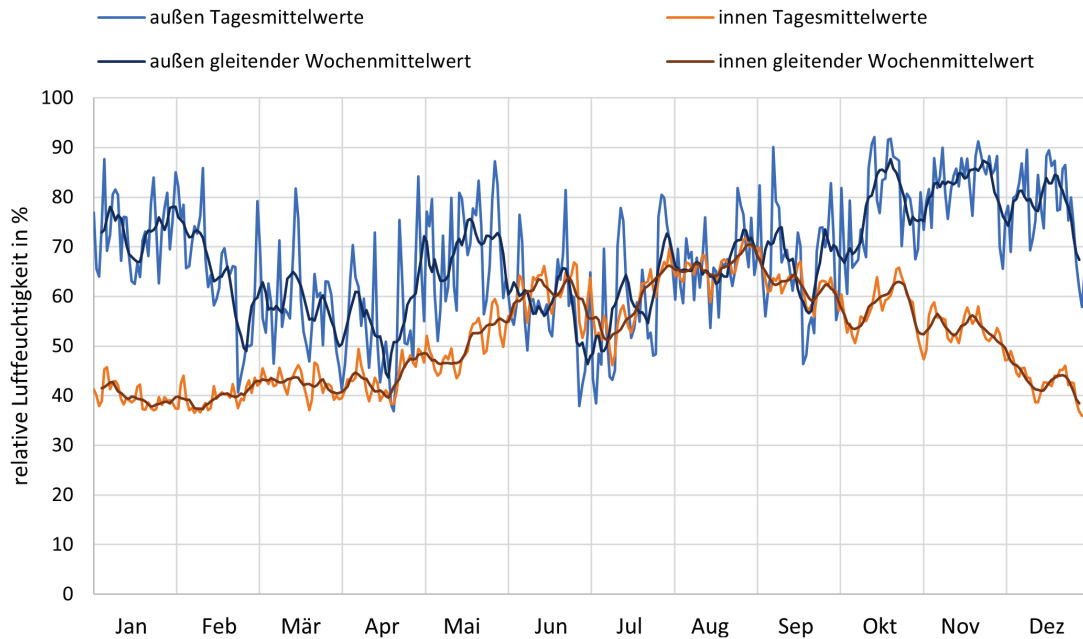


Abbildung 6: Gemessene relative Außen- und Raumluftheuchtigkeit am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt;

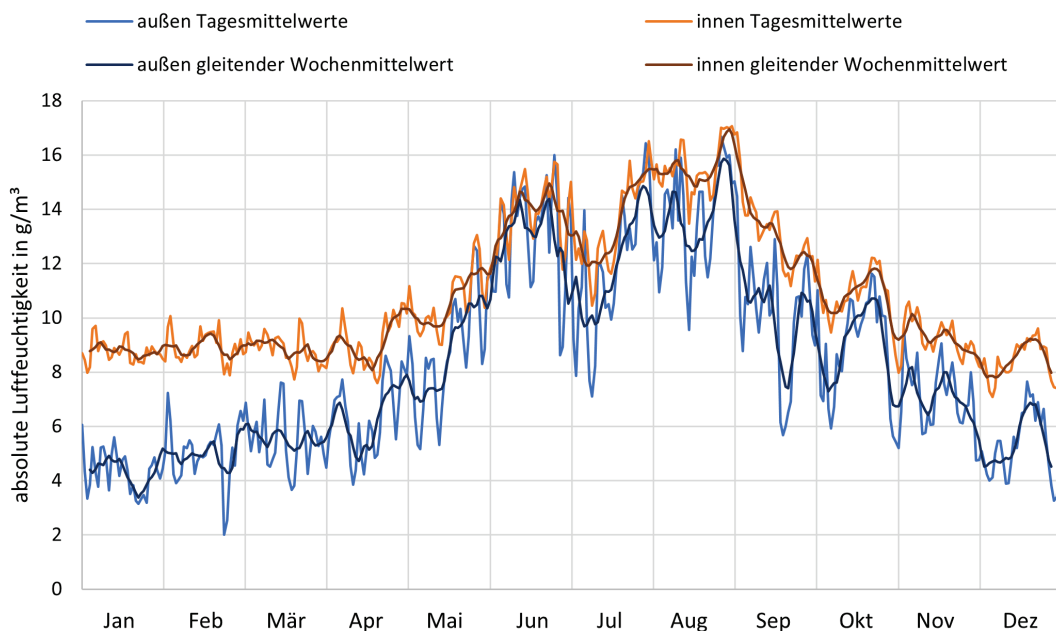


Abbildung 7: Gemessene absolute Außen- und Raumluftheuchtigkeit am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt;

Zur Einschätzung des Schadensrisikos einer Konstruktion können verschiedene Methoden angewandt werden. Bei der Beurteilung des Risikos für Schimmelpilzbildung werden die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Dauer der Einwirkung herangezogen. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass das Risiko für Schimmelpilzbildung ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % deutlich ansteigt. Die detaillierte Berechnung des Schimmelwachstums wird in Abschnitt 4.6.3 erörtert.

Aufgrund der oben erwähnten physikalischen Zusammenhänge wird klar, dass in belüfteten Kellerbereichen das Risiko für Schimmelpilzbildung im Frühjahr bzw. im Frühsommer am größten ist. Wenn die Kellerbauteile nach der Winterperiode noch kühl sind, das Außenklima jedoch bereits warm und dementsprechend feucht ist, sollte eine Kellerdurchlüftung weitestgehend unterbunden werden.

3.1.5. Stand der aktuellen Normung

Bei der Sanierungsplanung von Kellern in Gründerzeithäusern müssen unterschiedliche Normen und Regelwerke hinsichtlich feuchtetechnischer, energetischer und nutzungsrelevanter Anforderungen berücksichtigt werden. Im Folgenden werden nur die Maßnahmen zur Mauerwerkstrochenlegung angeführt.

Die ÖNORM B 3355 enthält die Grundlagen für die Sanierung von feuchtem Mauerwerk und stellt normierte Sanierungsmethoden vor. Diese reichen von Injektionen über Durchschneideverfahren bis hin zu außenliegenden Abdichtungsmaßnahmen. Im innerstädtischen Bereich mit geschlossener Bauweise ist jedoch in den meisten Situationen eine außenliegende Abdichtung nicht ausführbar. Gleichzeitig ist das Durchschneiden von Mauerwerk nur über dem Gehsteigniveau möglich. Dadurch wird zwar der Kapillartransport in das darüberliegende Mauerwerk unterbunden, das Kellermauerwerk bleibt aber unverändert. Eine innenliegende Vertikalabdichtung in Kombination mit durchgeschnittenem Mauerwerk (vgl. Abbildung 8) erfordert eine saubere Ausführung und birgt das Risiko einer nicht dauerhaft schadensfreien Sanierung. Ein Verpressen des Mauerwerks im Fundamentbereich führt dazu, dass der Kapillartransport von aufsteigendem Wasser unterbunden wird. Oberflächen- oder Sickerwasser kann jedoch über die erdanliegenden Wandbereiche der Kellermauern weiterhin in das Mauerwerk eindringen. Außerdem sind Injektionsverfahren relativ teuer und aufwendig in der Umsetzung, wenngleich sie oft zur Steigerung der Tragfähigkeit des Mauerwerks bei Gebäudeaufstockungen eingesetzt werden müssen.

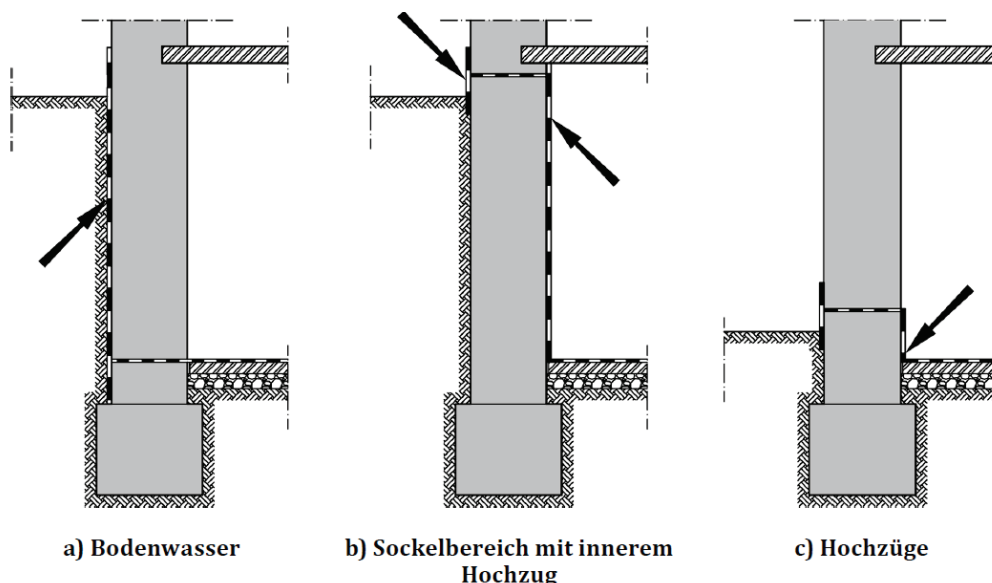


Bild 9 — Anwendungsbereiche Vertikalabdichtungen

Abbildung 8: Auszug aus der ÖNORM B 3355: 2017-03-01; Anwendung von Vertikal- und Horizontalabdichtungen bei erdberührtem sowie freistehendem Mauerwerk

Es zeigt sich, dass die normierten Verfahren zur Mauerwerkstrookenlegung bei Gründerzeithäusern in der Regel nicht praxistauglich und nur schwer anwendbar sind. Die Norm erwähnt im letzten Punkt 16 die Möglichkeit von „Klimatischen Maßnahmen“. Darunter ist die kontrollierte Be- und Entlüftung sowie eine gegebenenfalls erforderliche Luftentfeuchtung zu verstehen. Die Praxiserfahrung zeigt, dass diese Maßnahmen oft sehr günstig und vor allem sehr effektiv sein können. In Lagerkellern kann eine geringfügige Anhebung der Raumlufttemperatur und ein geringer Luftwechsel im Sommer sowie eine vermehrte Lüftung im Winter zu einer nachhaltigen Entfeuchtung führen. In bewohnten Kellerbereichen müssen neben einer feuchtegesteuerten Lüftungsanlage noch andere Parameter berücksichtigt werden, die im Zuge von „space4free“ erarbeitet und getestet wurden.

3.2. Sanierungskonzept Gassner & Partner

Gassner & Partner Baumanagement GmbH saniert und revitalisiert seit mehr als 20 Jahren desolate Gründerzeithäuser mit dem Fokus auf der Steigerung der Energieeffizienz bei gleichzeitigem Erhalt der alten Bausubstanz und innerstädtischer Nachverdichtung durch Schaffung von zusätzlichem Wohnraum. Dies erfolgt einerseits durch Aufstockung der Gebäude mit Dachgeschoßausbauten in Niedrigstenergiebauweise und andererseits durch eine Nutzbarmachung von Erdgeschoß- und Souterrainbereichen. Die Sanierungsobjekte sind in der Regel im Besitz von Ulreich Bauträger und werden exklusiv für den Auftraggeber umgeplant.

Um einen Kellerbereich als Wohnraum nutzen zu können, ist eine ausreichende Belichtung der Räume mit natürlichem Licht eine Grundvoraussetzung. Straßenseitig ist eine Belichtung bei Gründerzeithäusern meist durch die bestehenden Oberlichtfenster möglich, da das Erdgeschoß in der Regel als Hochparterre ausgeführt wurde. Hofseitig wird die Belichtung durch die Absenkung des ursprünglichen Niveaus um ein Stockwerk geschaffen. Die bestehenden Oberlichten der Kellerluken werden bis zum Kellerfußboden als „französische“ (bodengleiche) Fenster geöffnet, während das Hofniveau ebenfalls bis zur Kellersohle abgegraben wird. Somit wird die ursprüngliche Kellerebene zum hofseitigen Erdgeschoß. Durch diese Maßnahmen entstehen Gartenwohnungen mit hofseitigen Terrassen, die einerseits helle, lichtdurchflutete Wohnbereiche und andererseits einen kühlen begrünten Innenhof bieten. Der Vergleich der Schnittzeichnungen in der folgenden Abbildung 9 zeigt den Originalzustand und die umgebaute Situation der Gartenwohnung mit abgesenktem Hofniveau am Beispiel des Objekts Erlgasse 38. Die Fotos in Abbildung 10 zeigen die Öffnungen der Kellerfenster beim Ausgraben des Innenhofes.

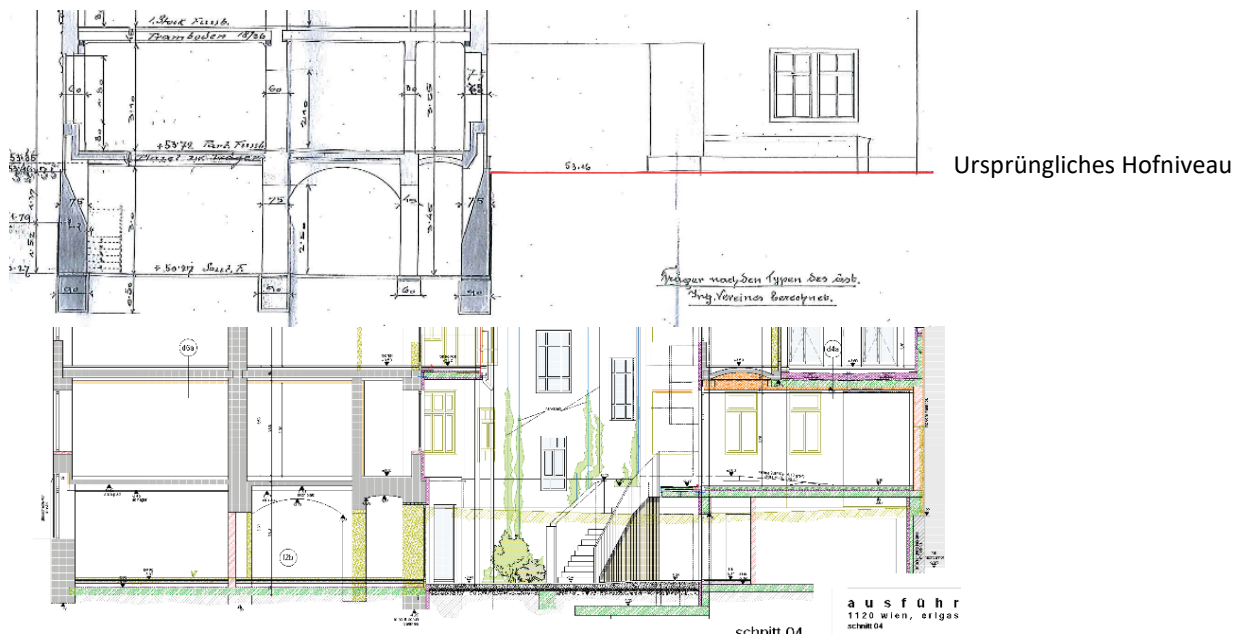


Abbildung 9: Querschnitt durch ein Gründerzeithaus vor der Sanierung (Originalplan, oben) und nach der Sanierung mit abgesenktem Hofniveau (Polierplan Gassner & Partner, unten)



Abbildung 10: Absenkung des Hofniveaus und Öffnung der Kellerfenster bis zum Kellerboden am Beispiel Erlgasse 38; Fotos: Baustellendokumentation Gassner & Partner

Die Absenkung des Hofniveaus bietet neben der Belichtung einen weiteren wesentlichen Vorteil. Die ursprünglich erdberührte Kelleraußenwand wird freigelegt und kann an der Außenseite gedämmt und im Sockelbereich abgedichtet werden. Dadurch werden die Wärmeverluste und das Risiko für einen Feuchteschaden minimiert. Weiters wird das Oberflächenwasser gezielt abgeleitet, um ein Eindringen in die Kellerwände und in das bestehende Fundament zu vermeiden.

Im übrigen Kellerbereich werden ebenfalls Maßnahmen zur Eindämmung der Mauerfeuchtigkeit ergriffen. Straßenseitig ist die Errichtung einer außenliegenden Abdichtung nicht möglich, da der Gehsteigbereich im öffentlichen Gut aufgrund möglicher Einbauten nicht abgegraben werden kann. Das bestehende Mauerwerk bleibt somit erdberührt. An der Innenseite erdberührter Bauteile werden Altputz und Salzausblühungen mechanisch entfernt und gegebenenfalls auch abgewaschen. Auf die gereinigten Oberflächen wird ein diffusionsoffener und hochporöser Zementputz (Diffupor®) [DIF 21]

in mehreren Schichten aufgebracht. Die fertige Oberfläche wird mit einer diffusionsoffenen mineralischen Farbe beschichtet. Die großflächige Anwendung des Feuchtmauerputzes Diffupor® in mehr als 20 Objekten von Ulreich Baurträger während der letzten zehn Jahre zeigt die Funktionstüchtigkeit der angewandten Maßnahmen. Trotz teilweise intensiver Mauerfeuchte mit einem Durchfeuchtungsgrad von bis zu 100% im Originalbestand können die Kellerbereiche nach der Sanierung mit dem Feuchtmauerputz nachhaltig schadensfrei gehalten werden. Dies gilt gleichermaßen für sämtliche Lagerkeller und Wohnbereiche.

Die Sanierungsstrategie von Gassner & Partner mittels Feuchtmauerputz unterscheidet sich von den Vorgaben der ÖNORM B 3355, da bei einem typischen Gründerzeitkeller keine horizontalen und vertikalen Abdichtungen am bestehenden Mauerwerk sinnvoll installiert werden können. Wie die langjährige Praxiserfahrung zeigt, sind die Abdichtungen in der Regel nicht erforderlich. Ein typisch feuchtebelastetes Mauerwerk, das nicht im drückenden Grundwasser steht, kann durch einen diffusionsoffenen Putz in Kombination mit einer kontrollierten Be- und Entlüftung der Kellerräume ausreichend abtrocknen und dauerhaft schadensfrei bleiben. Dennoch muss in der Ausführung zwischen Bereichen mit Lagerkellern und Wohnbereichen bei der Planung von Lüftungsanlagen und Dämmmaßnahmen unterschieden werden.

Am folgenden Beispielgrundriss des Objekts Neilreichgasse 3-5 (siehe Abbildung 11) wird deutlich, dass Lagerkeller und Wohnbereiche direkt nebeneinander liegen können.

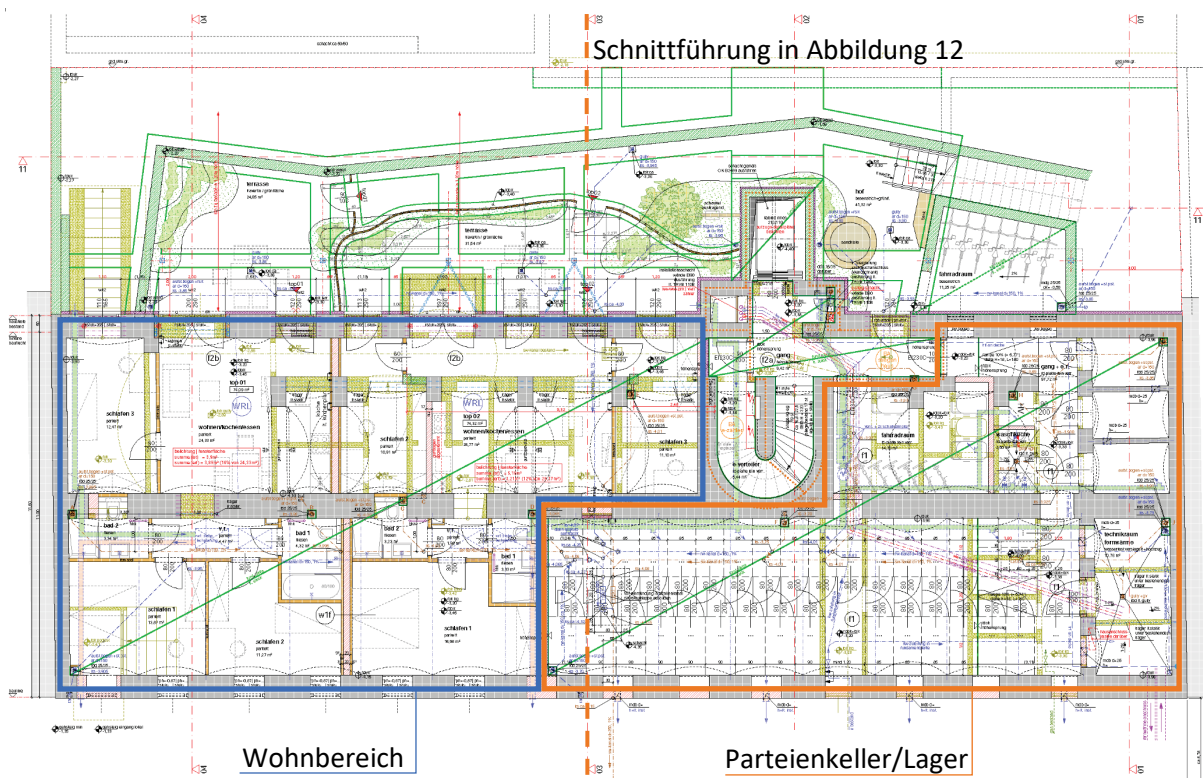


Abbildung 11: Kellergrundriss des Objekts Neilreichgasse 3-5; die Wohnbereiche und der Parteienkeller sind markiert. (Polierplan Gassner & Partner)

Im Parteienkeller erfolgt die Belüftung mit einem feuchtegeregelten Rohrventilator, der durch Einblasen trockener Außenluft über ein Rohrverteilsystem im gesamten Lagerkeller einen Überdruck erzeugt. Die Überdruckregelung ist gegenüber dem Absaugen (Unterdruckregelung) feuchter Kellerluft zu bevorzugen, da gezielt trockene Luft in das Gebäude gebracht wird. Das Lüftungsrohr mit den Einblasöffnungen verläuft in der Regel nahe der Mittelmauer, wodurch die Frischluft den Keller

durchströmt und durch die hof- und straßenseitigen Überströmöffnungen nach außen gelangen kann. Somit wird eine optimale Durchlüftung des Lagerkellers sichergestellt und Totluftbereiche mit erhöhtem Feuchterisiko werden vermieden. Die Lüftungssteuerung erteilt nur dann eine Lüftungsfreigabe, wenn der Feuchtegehalt der Außenluft geringer ist als jener der Kellerluft.

In den als Wohnraum ausgebauten Kellerbereichen wird je Wohneinheit eine vollautomatische Wohnraumlüftung installiert, die eine Volumenstromregelung und einen Wärmetauscher zur Steigerung der Energieeffizienz beinhaltet. Außerdem ist eine Feuchtesteuerung, analog der Regelung in den Parteienkellern, vor die interne Regelung des Lüftungsgeräts geschaltet. Dadurch wird das Lüftungsgerät ausgeschaltet, wenn die absolute Außenluftfeuchte größer als die Raumluftfeuchte ist. Diese Art der Regelung kann jedoch dazu führen, dass bei länger andauernden Regenphasen oder bei feuchtwarmem Wetter im Sommer kein Luftwechsel stattfindet. Diese Lüftungsstrategie steht in klarem Widerspruch zu den hygienischen Anforderungen einer Wohnungsnutzung wie in Abschnitt 4.5 beschrieben.

In der folgenden Abbildung 12 werden die Sanierungsmaßnahmen im Bereich des Parteienkellers und der Gartenwohnung am Beispiel des Objekts Neilreichgasse 3-5 genauer erörtert. Die nachfolgend aufgelisteten Sanierungsmaßnahmen sind in der Schnittzeichnung mit Nummern verortet.

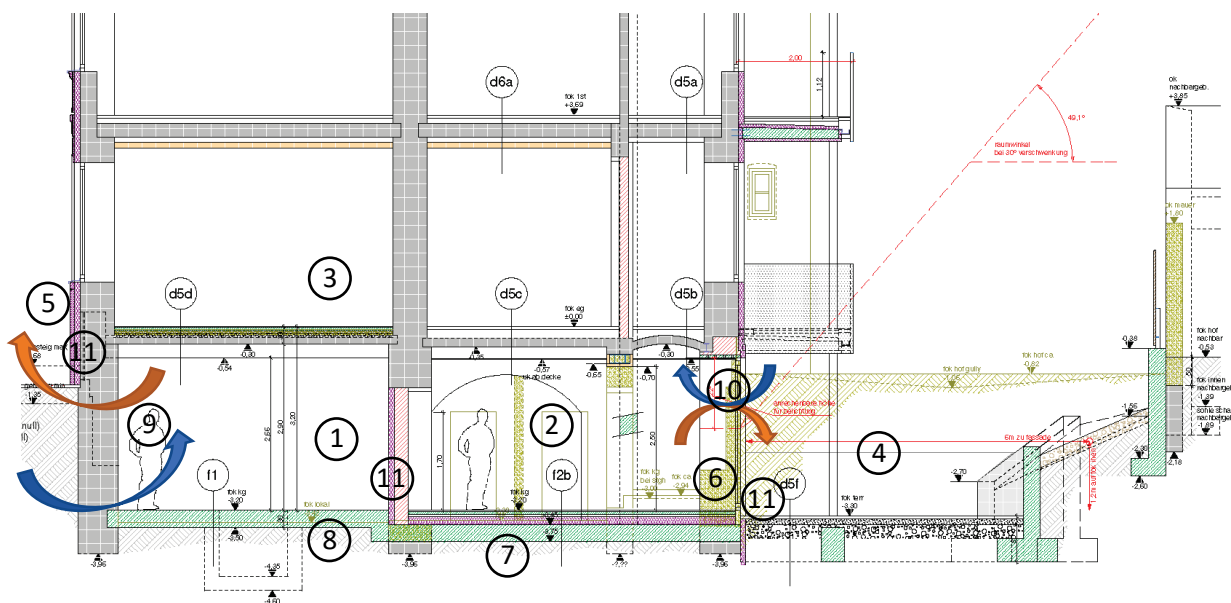


Abbildung 12: Gebäudeschnitt mit Bezeichnung der Sanierungsmaßnahmen im Bereich des Lagerkellers und der Souterrainwohnung; Polierplan Gassner & Partner

- | | | | |
|---|---------------------------------|----|---|
| 1 | Lagerkeller | 7 | Gedämmter Fußbodenaufbau |
| 2 | Souterrain-/Gartenwohnung | 8 | Nicht gedämmte Stahlbetonplatte |
| 3 | Erdgeschoßwohnung | 9 | Kellerlüftung mit Zuluftventilator und Überströmöffnungen |
| 4 | Hofbereich abgesenkt | 10 | Wohnraumlüftung |
| 5 | Straßenseitige Oberlichtfenster | 11 | Dämmung der Wohnbereiche |
| 6 | Hofseitige bodengleiche Fenster | | |

3.3. Schadensbeispiele aus der Praxis

Die folgenden Schadensbeispiele und Problemfälle wurden in bestehenden Gründerzeithäusern der Ulreich Bauträger GmbH dokumentiert und werden hier anonymisiert vorgestellt.

3.3.1. Erdberührter Keller mit Büronutzung

Das Gebäude wurde 2008 generalsaniert, wobei auch die Kellerbereiche nutzbar gemacht wurden. Ein Teil des Kellers wurde in ein Büro umgebaut. Während die Wände des Parteienkellers nicht verputzt, sondern die gebürsteten Ziegel mit einem Kalkanstrich beschichtet wurden, wurde der benachbarte Kellerbereich für die Büronutzung mit einem herkömmlichen Sanierputz verputzt. Das Mauerwerk war in der Sanierungsphase stark feuchtebelastet. Der damalige Putzhersteller bewarb sein Putzsystem damit, dass es speziell auf nassen Oberflächen ein optimales Sanierungsergebnis liefern würde. Um das Mauerwerk zu entfeuchten, wurde eine Wandheizungsschleife verlegt, die an einen Niedertemperaturheizkreis mit geringem Durchlauf angeschlossen wurde.

Dennoch traten bereits in den ersten paar Jahren nach der Sanierung deutlich sichtbare Flecken an den Putzoberflächen auf. Die folgenden Abbildungen zeigen den Zustand im Jahr 2018, zehn Jahre nach der Sanierung des Kellerbereichs.



Abbildung 13: Feuchteschäden am erdberührten Mauerwerk infolge Salzausblühungen



Abbildung 14: Kellermauerwerk ohne Verputz mit Wandtemperierung (links); fertige Sanierung mit Lüftungsleitung (rechts)

Im Jahr 2018 – also zehn Jahre nach der Sanierung – waren die massiven Salzausblühungen und die Korrosion an Wandleuchten bzw. Elektroinstallationen so weit fortgeschritten, dass eine Nutzung der Räume als Büro nicht mehr möglich war. Das Souterrainbüro wurde neuerlich saniert. An den erdberührten Ziegelwänden wurde der Putz entfernt und die Lagerfugen wurden ausgekratzt. Danach wurden die Wände mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Putzsystem der Firma Diffupor® verputzt. Außerdem wurde eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Zuluft und Abluft installiert. Dadurch wurde sichergestellt, dass Feuchteemissionen aus den Bauteilen abgeführt werden und die Raumlufffeuchte dauerhaft keine kritischen Werte erreicht. Auch drei Jahre nach der zweiten Sanierung des Souterrainbüros sind bislang keine Schäden aufgetreten.

3.3.2. Souterrainbüro mit sommerlicher Feuchteproblematik

Das Gebäude wurde 2001 generalsaniert und beherbergt ein Büro im straßenseitigen Keller- und Erdgeschoßbereich. Der Eingang zum Büro, eine Garderobe, ein Aufenthaltsraum sowie eine Küche befinden sich im Erdgeschoß. Eine einläufige Stiege reicht in den offenen, mit Gewölben ausgestatteten Kellerbereich (Abbildung 15). Aufgrund der leichten Hanglage sind die straßenseitigen Fenster und die erdberührten Wände unterschiedlich hoch. Der Hofbereich wurde abgesenkt und ist ebenerdig vom Büro aus zu erreichen. Das Objekt verfügt über keine Lüftungsanlage. Der Luftwechsel erfolgt ausschließlich über Fensterlüftung, wobei der über zwei Geschoße zusammenhängende Luftraum einen starken thermischen Auftrieb erzeugt. Es traten bislang keine Schäden an den Bauteilen auf, dennoch führt das feuchte Raumklima zu unbehaglichen und teilweise unhygienischen Zuständen. Aufgrund der großen Speichermasse von Wänden, Fußböden und Gewölbedecken kommt es in den Räumen über das Jahr hinweg nur zu sehr trägen Temperaturschwankungen. Dies führt dazu, dass das Raumklima in den Sommermonaten tendenziell zu kalt ist und infolge der unkontrollierten Lüftung die relative Luftfeuchte in den Kellerräumen stark ansteigt. Die Nutzer:innen beklagten welliges oder sogar weiches Papier, Kondensationsflecken an Fußbodenstellen und schnell auftretenden Schimmel an Speiseresten und Kaffeesud in der Küche.



Abbildung 15: Souterrain mit Büronutzung und Stiege zum Erdgeschoß

Eine Raumklimamessung über mehrere Monate (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17) bestätigte, dass während der Sommermonate die Raumlufffeuchte kritische Werte von 80% im Tagesmittel erreichte. Aufgrund der kühlen Bauteile und der unbehaglichen „Strahlungskälte“ öffneten die Nutzer:innen die Fenster, um warme Luft durch die Büroräume ziehen zu lassen. Dadurch kam es

temporär zu einer Erwärmung der Raumluft, die Oberflächentemperaturen der Bauteile waren hingegen deutlich niedriger.

Die Temperaturverläufe in der folgenden Abbildung 16 zeigen einerseits den Unterschied zwischen der Raumluft im Keller und im Erdgeschoß, andererseits die noch deutlich geringere Lufttemperatur im Fußbodenbereich des Kellers während der Sommermonate. Die tatsächliche Oberflächentemperatur wurde nicht erhoben. In der zweiten Oktoberwoche wurde die Fußbodenheizung aktiviert, wodurch die Temperaturen sprunghaft anstiegen.

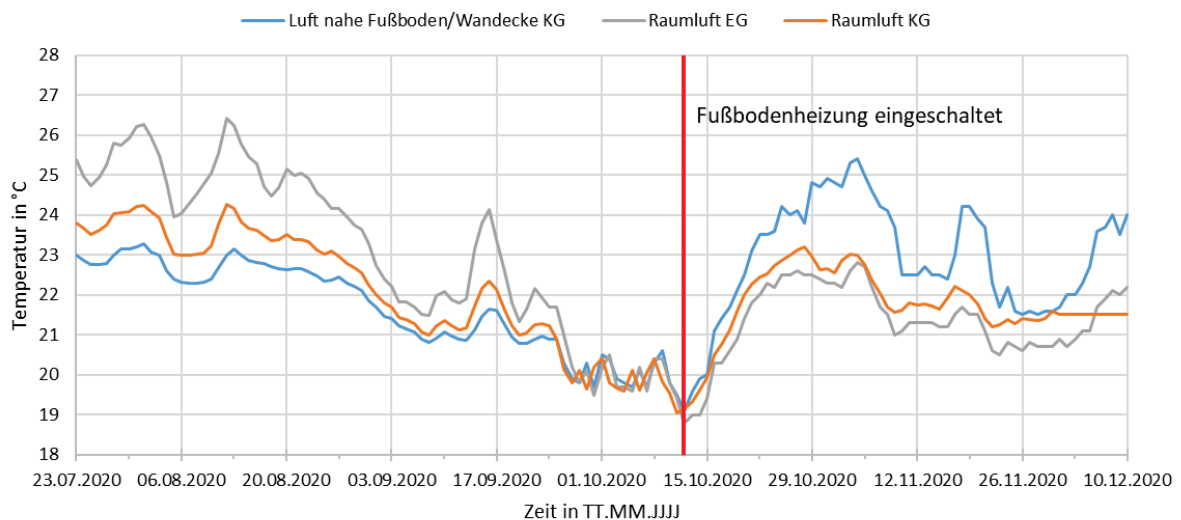


Abbildung 16: Gemessener Temperaturverlauf im Erdgeschoß, im Kellergeschoß und in der Bauteilecke Wand/Fußboden

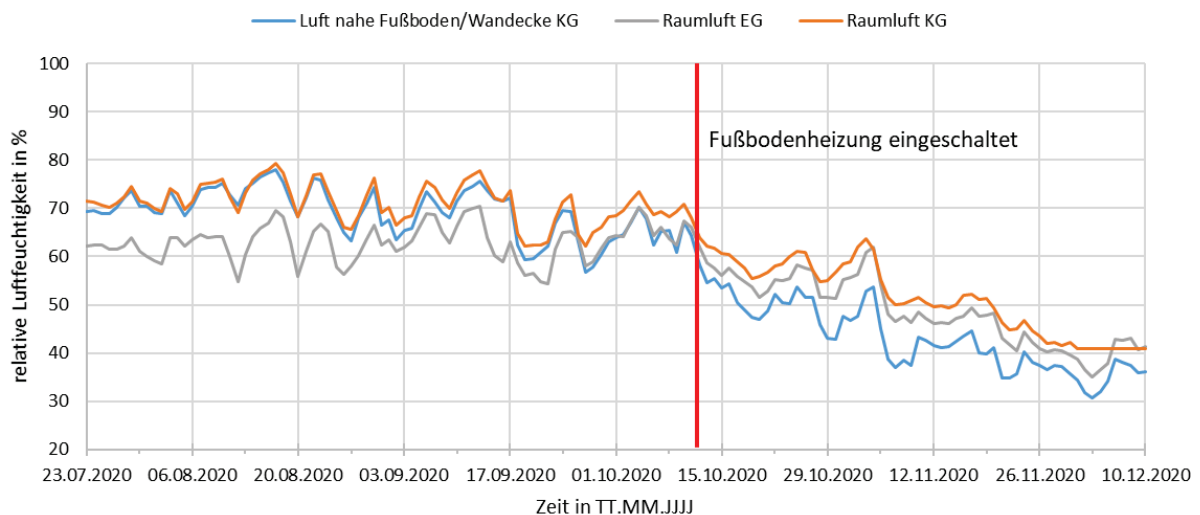


Abbildung 17: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit im Erdgeschoß, im Kellergeschoß und in der Bauteilecke Wand/Fußboden

Nach Analyse der Messdaten und Besprechung mit den Nutzer:innen des Büros wurde entschieden, vorerst keine bautechnischen Maßnahmen durchzuführen. Es wurde lediglich auf ein optimiertes Lüftungsverhalten hingewiesen, wobei im Sommer das Lüften unter Tags reduziert werden sollte. Weiters wurde der Betrieb der Fußbodenheizung auf die Übergangszeit ausgedehnt, um die Bauteile ausreichend zu temperieren.

3.3.3. Souterrainwohnung mit geringer Belegung und unzureichendem Luftwechsel

Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine kleine Wohnung mit einer einseitigen Fenster- bzw. Belichtungsfläche mit Terrasse und Garten. Somit ist keine Querlüftung der Wohnung möglich. Mehr als 50% der Außenwände sind erdberührt und an der Außenseite nicht abgedichtet. Die Wohnung wird durch die Fenster be- und entlüftet, da es keine Lüftungsanlage gibt. Nur im WC und im Bad ist jeweils eine mechanische Abluft vorhanden. Die Wohnung wird von einer Person bewohnt, die während der Sommerferien (Juli und August) nicht in der Wohnung anwesend ist. In diesem Zeitraum ist die Wohnung ungenutzt und wird nicht belüftet. Aufgrund des äußerst geringen Luftwechsels und der dennoch vorhandenen Feuchteemissionen aus dem umgebenden Mauerwerk entstand in der Wohnung ein unhygienisch feuchtes Klima. In Kombination mit „abgestandener“ Luft führte dies zu Schimmelpilzbildung an einzelnen Wandstellen, an der Einrichtung sowie am Geschirr und an Küchenkästen.

Die Erkenntnis aus diesem Schadensfall, der eines der ersten Sanierungsprojekte von Ulreich Bauträger betraf, war, dass Wohnungen mit erdberührten Bauteilen, die nicht abgedichtet sind, immer eine mechanische Lüftungsanlage benötigen. Die Lüftung muss für einen Grundluftwechsel und eine Kontrolle der Raumluftfeuchte sorgen.

3.3.4. Erdgeschoßwohnung mit hoher Feuchtelast und kaltem Fußboden

Die Wohnung liegt im Erdgeschoß eines sanierten Gründerzeithauses und verfügt über die Möglichkeit der Querlüftung. Weiters ist eine automatische Heizanlage über Fernwärme mit Radiatoren und einem zentral gelegenen Raumthermostat vorhanden. Genutzt wird die Wohnung durch ein junges Pärchen, die in der Regel morgens duschen und danach die Wohnung verlassen. Aufgrund der Lage der Wohnung im Erdgeschoß werden die Fenster bei Abwesenheit geschlossen gehalten. Der mechanische Abluftventilator im Bad wird aus Effizienzgründen ebenfalls abgedreht.

Aufgrund des geringen Luftwechsels wird die Feuchtelast nach dem Duschvorgang nicht nach außen abgeführt, sondern in den Bauteilen sowie den Einrichtungsgegenständen gepuffert. Die Feuchtigkeit verteilt sich in der gesamten Wohnung und es kommt zu einer Anfeuchtung sämtlicher Gegenstände.



Abbildung 18: Schimmelpilzbildung an der Unterseite einer Couch infolge erhöhter Raumluftfeuchte, geringer Konvektion und kalter Bauteile

Aufgrund des relativ kühlen Fußbodens über dem Keller kam es während der Wintermonate zu Schimmelpilzbildung an der Unterseite von Bett und Couch. Der schwach belüftete Raum unter der Couch begünstigte eine niedrige Oberflächentemperatur des Fußbodens und der Wand. Die Messdaten in Abbildung 19 zeigen die Temperaturen (oben) und die relative Luftfeuchtigkeit (unten) anhand von Tagesmittelwerten in Raummitte, unter der Couch sowie im Fußboden-Wand-Anschluss hinter der Couch. Die relative Luftfeuchte erreicht im Kernwinter überkritische Werte. Auch in den Sommermonaten werden Feuchtespitzen nahe 80% relativer Luftfeuchte erreicht.

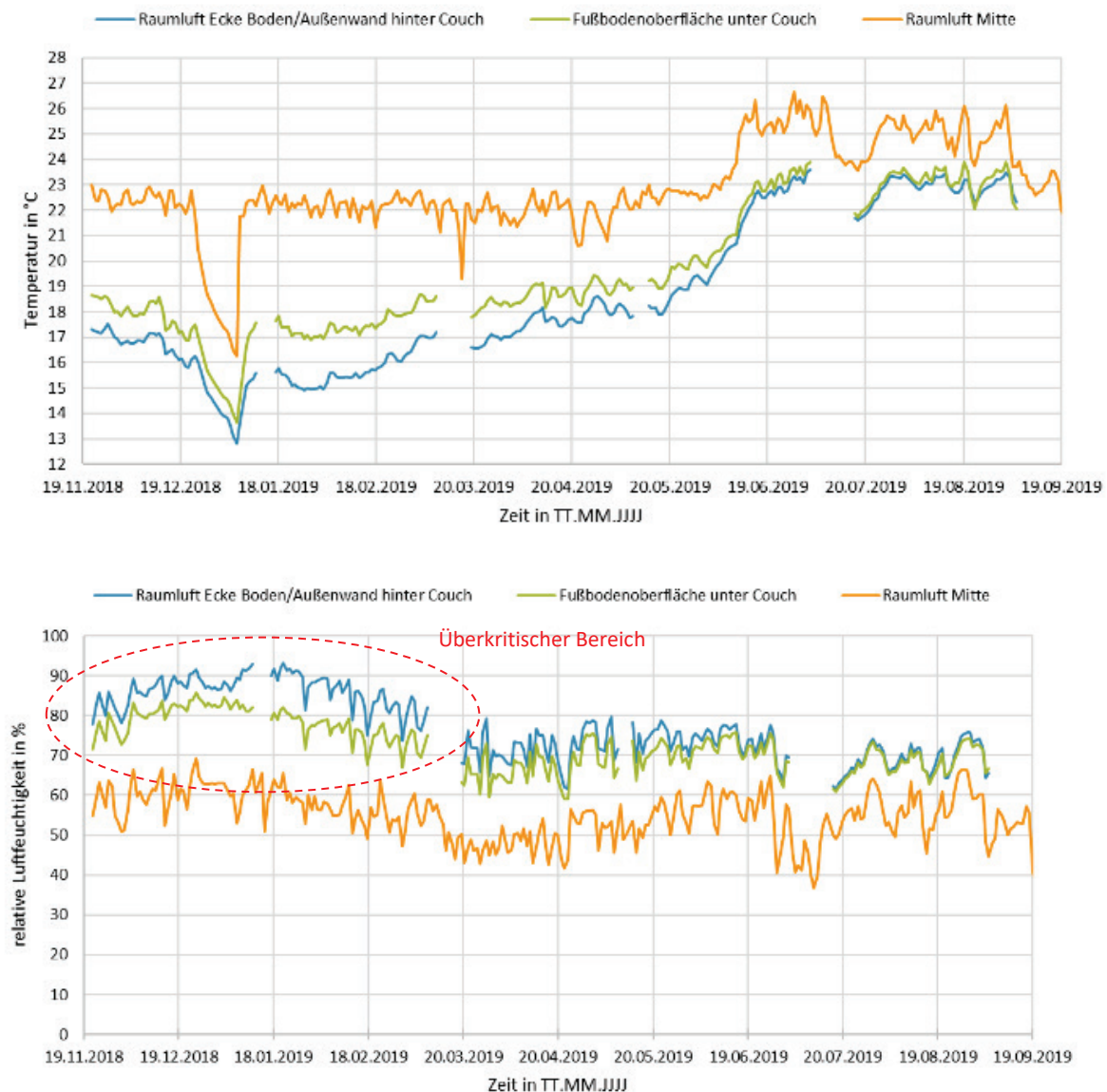


Abbildung 19: Gemessene Temperatur (oben) und gemessene relative Luftfeuchtigkeit (unten) der Raumluft an den Positionen in Raummitte, unter der Couch sowie hinter der Couch in der Ecke des Boden-Wand-Anschlusses; in der Messung sind Winter- und Sommerzustand erkennbar; es sind Tagesmittelwerte dargestellt.

Die produzierte Feuchtemenge wurde über einen längeren Zeitraum nicht ausreichend an die Außenluft abgeführt. Dies wird bei der Einordnung des Raumklimas in die Luftfeuchteklassen gemäß ÖNORM EN ISO 13788 deutlich. Die folgende Abbildung 20 zeigt, dass der raumseitige Feuchteüberschuss in die Nutzungsklasse 4 fällt und somit über einer typischen Wohnungsnutzung liegt.

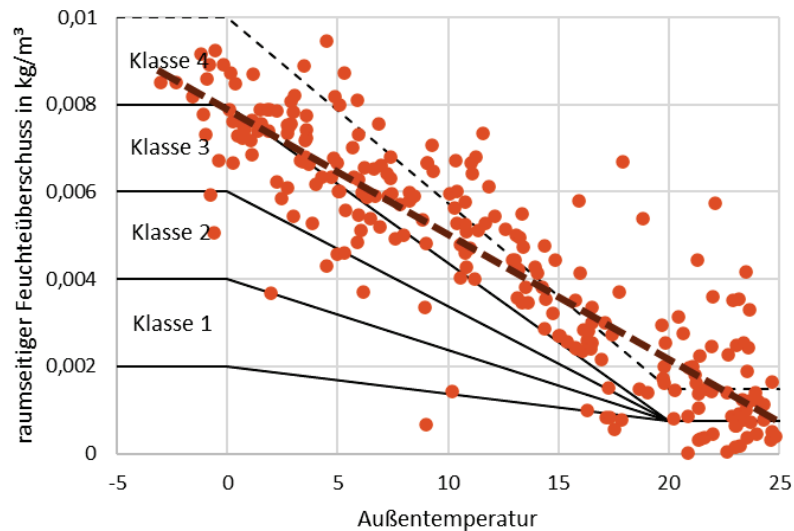


Abbildung 20: Einordnung des gemessenen Raumklimas in Luftfeuchteklassen gem. EN ISO 13788; das Raumklima entspricht der Klasse 4, was gem. Norm einer Nutzung als „Schwimmbad“ entspricht

Im vorliegenden Fall wurde die Feuchteproblematik mit den Mieter:innen besprochen. Nach einem Mieterwechsel im Folgejahr trat das Problem nicht mehr auf.

3.3.5. Studenten-WG mit Einzelraumnutzung

Die Wohnung befindet sich in einem großen Eckhaus aus der Gründerzeit, das sich vor der Sanierung in einem stark desolaten Zustand befand und durch eine vollständige Entkernung, Wohnungszusammenlegungen sowie einen zweistöckigen Dachgeschoßausbau massiv aufgewertet wurde. Die Souterrainbereiche wurden nach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Sanierungskonzept umgebaut, wobei die Hofbereiche abgesenkt wurden und neue Wohnbereiche in den dem Garten zugewandten Kellerabschnitten entstanden.

Eine Souterrainwohnung wurde als Wohngemeinschaft für drei Personen ausgebaut. Dadurch weist das Objekt mit insgesamt vier Zimmern spezielle Merkmale auf, wie beispielsweise eine mechanische Be- und Entlüftung aller Aufenthaltsräume mittels Wohnraumlüftung, eine Trennung in Dusch- und Wannenbad sowie ein separates WC. Die Wohnung verfügt ausschließlich über eine hofseitige Belichtung. Alle Räume, die keine Aufenthaltsräume sind, liegen straßenseitig bzw. im Kern des Gebäudes und haben keine Fenster. Ungefähr zwei Drittel aller Wandflächen sind erdberührt, wobei die straßenseitigen Wandflächen zur Gänze unter dem Gehsteigniveau liegen. Dadurch sind die Feuchteemissionen aus den Bauteilen beträchtlich, gleichzeitig verfügt die Wohnung über große Speichermassen. Dies führt zu einem annähernd konstanten Temperaturverlauf der Raumluft über das Jahr. Auch während der Sommermonate liegt die Raumlufttemperatur bei ca. 23°C, also deutlich unter der mittleren Außenlufttemperatur. Infolge des Luftwechsels mit der Außenluft erreicht die relative Raumluftfeuchte kritische Werte über 80%, wie Abbildung 21 anhand von Tagesmittelwerten verdeutlicht.

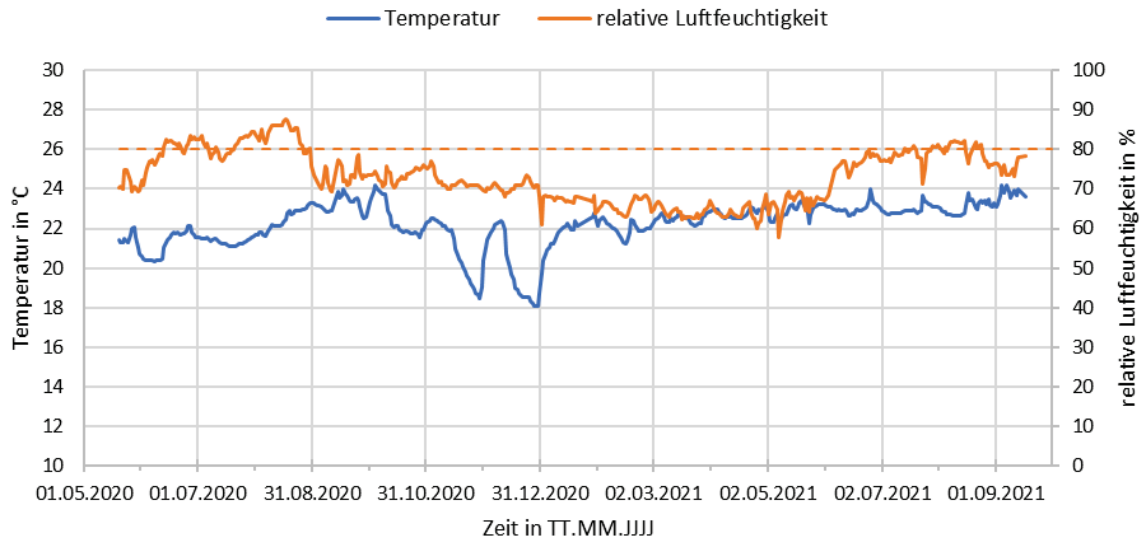


Abbildung 21: Verlauf von gemessener Temperatur und gemessener relativer Luftfeuchtigkeit der Raumluft über zwei Sommerperioden mit Markierung der kritischen Marke von 80% relativer Luftfeuchtigkeit; es sind Tagesmittelwerte dargestellt.

Da die Nutzer:innen während der Ferienzeit und zuletzt auch während der Lockdownphasen infolge der COVID-19-Pandemie nicht in der Wohnung anwesend waren, kann man davon ausgehen, dass die Feuchtelasten fast zur Gänze aus Emissionen der Bauteile bestehen. Eine spezielle Be-/Entfeuchtungsmessung in zeitlich definierten Abschnitten (siehe Kapitel 5.4) lieferte genauere Informationen über die Feuchteemissionen. Trotz des hohen Risikos für Schimmelpilzbildung entstand in der beschriebenen Wohnung bislang kein Schaden. Derzeit wird versucht, mittels intelligenter Lüftungssteuerung eine nachhaltige Senkung der Raumluftfeuchte zu erreichen. Es zeichnet sich jedoch ab, dass ohne eine aktive Entfeuchtung oder Beheizung die Raumluftfeuchte nicht reduziert werden kann.

3.3.6. Maisonettewohnung EG/KG

Die Wohnung besteht aus einem Erdgeschoß und einem ursprünglich unter dem Außenniveau gelegenen Kellergeschoß. Die Hofflächen wurden abgesenkt und sind vom Untergeschoß ebenerdig begehbar. Die Wohnung verfügt über eine kontrollierte Wohnraumlüftung, die jedoch keine spezielle Regelung aufweist.

In den Sommermonaten 2019 traten an der Feuermauer zum Nachbargebäude Verfärbungen sowie stellenweise Schimmelflecken auf. Vor allem in einer Außenecke war ein deutlicher Schimmelbefall sichtbar. Die Verfärbungen beschränkten sich auf eine Höhe bis ca. 50 cm über dem Fußboden. Nachdem ein Wasserschaden ausgeschlossen werden konnte, deutete alles auf kalte Bauteile hin, die aufgrund der geringen Oberflächentemperatur ein erhöhtes Risiko für Schimmelpilzbildung aufweisen. Die folgenden Fotos in Abbildung 22 zeigen die auffälligen Verfärbungen im unteren Wandbereich und in der Ecke.



Abbildung 22: Schimmelpilzbildung an der Wandoberfläche des Kellergeschoßes im Bereich der Feuermauer

Es wurden umgehend Datenlogger in der Wohnung ausgelegt, um das Raumklima (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) zu erfassen. Es zeigte sich, dass vor allem während der Sommermonate ein deutliches Temperaturgefälle zwischen Erdgeschoß und Kellergeschoß besteht. Die Räume im Untergeschoß bleiben über das Jahr hinweg konstant kühl. Im Obergeschoß hingegen sind jahreszeitliche Schwankungen erkennbar. Da die beiden Lufträume zusammenhängen, stellt sich eine gleichmäßige absolute Feuchteverteilung über die gesamte Wohnung ein, die jedoch infolge der Temperaturunterschiede im Untergeschoß zu einer deutlich höheren relativen Luftfeuchtigkeit führt.

Zur genaueren Analyse der Schimmelproblematik an der Feuermauer wurde ein Datenlogger mit Temperatur-/Luftfeuchtesensor unter einer gut durchlüfteten Holzbank im Küchen-/Essbereich des Untergeschoßes, ca. 20 cm von der Feuermauer entfernt, montiert. Direkt daneben wurde an der Feuermauer ein Temperatursensor an die Oberfläche geklebt. Als Referenz für beide Temperaturmessungen diente die Raumluftmessung im angrenzenden Wohnzimmer. Die ungefähren Sensorlagen sind in Abbildung 23 schematisch eingezeichnet.

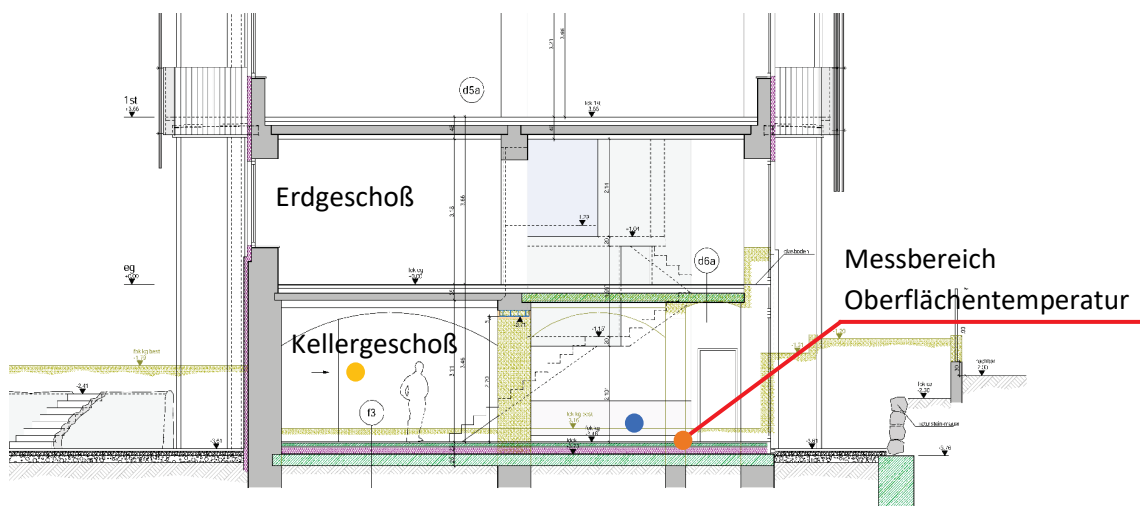


Abbildung 23: Schnitt durch die Maisonettewohnung mit Markierung der Sensorpositionen (gelb – Raumluft WZ, blau – Luft unter Küchenbank) analog zu den Auswertungen in Abbildung 24

Die Messergebnisse in Abbildung 24 (oben) zeigen eine deutliche Spreizung zwischen den Temperaturwerten im Wohnzimmer, unter der Küchenbank sowie an der Wandoberfläche nahe der Sesselleiste.

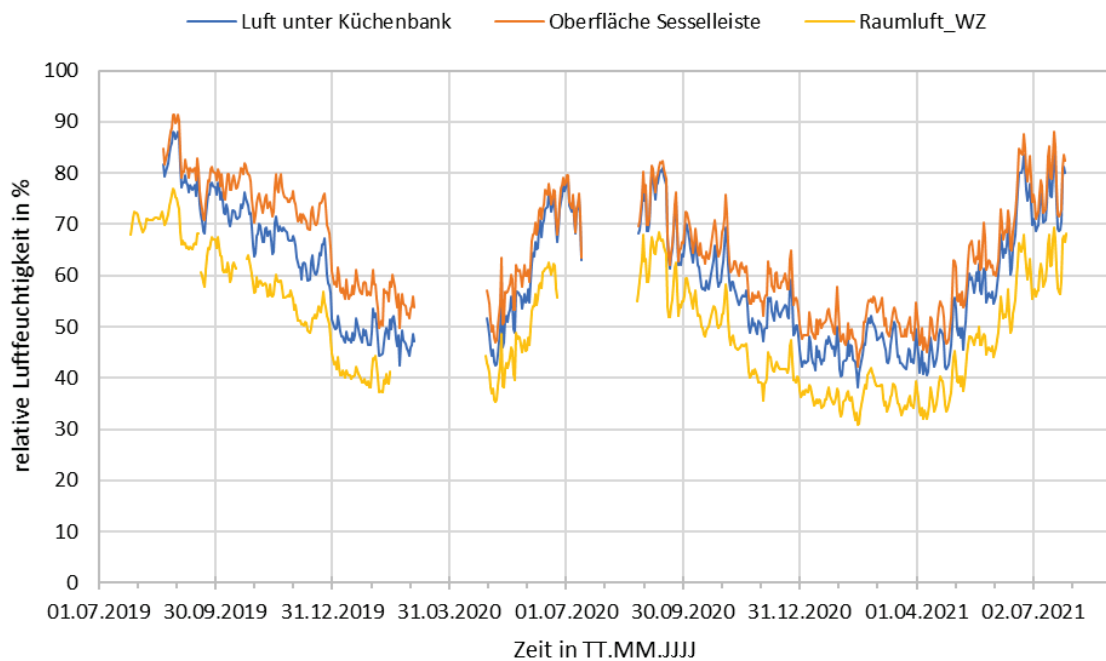
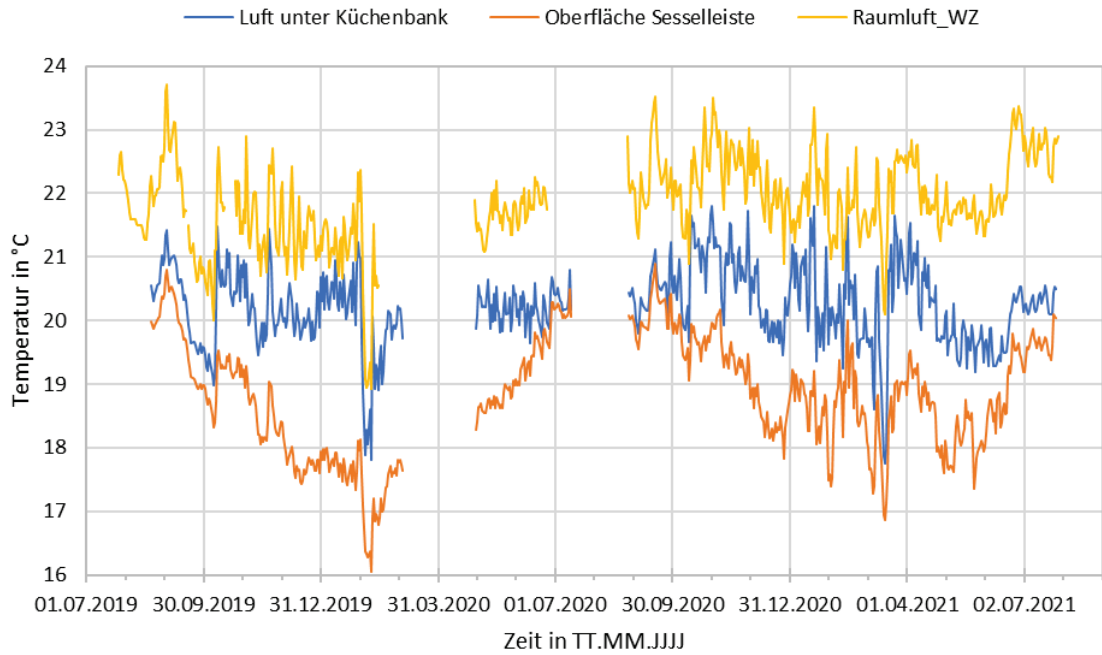


Abbildung 24: Temperatur (oben) und relative Luftfeuchtigkeit (unten)

Berechnet man die relative Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche unter Berücksichtigung der tatsächlichen Oberflächentemperatur, so wird deutlich, dass ein erhöhtes Risiko für Schimmelpilzbildung vorhanden ist. Die relative Luftfeuchtigkeit ist in Abbildung 24 (unten) dargestellt, wobei die Datenreihe „Oberfläche Sesselleiste“ aus den anderen Messpositionen und der gemessenen Oberflächentemperatur rückgerechnet wurde.

3.4. Forschungsfragen

Der Titel des Forschungsprojekts „space4free“ entstand aus der Überlegung, leerstehende, ungenutzte Kellerbereiche in Gründerzeithäusern als Wohnraum auszubauen und somit die innerstädtische Nachverdichtung zu forcieren. Dies sollte unter dem Aspekt der Effizienzsteigerung ohne eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs (HWB) des Bestandsgebäudes möglich sein, wenn der HWB der neu entstehenden Wohnungen annähernd gleich oder geringer ist als die ursprünglichen Wärmeverluste durch die unkonditionierten Kellerbereiche. Konkret müssen die Wärmeverluste durch die Kellerdecke sowie über Wärmebrücken zwischen Erdgeschoß und Keller im Originalbestand den tatsächlichen Heizwärmebedarf einer Souterrainwohnung übersteigen. Diese Möglichkeit der Wohnraumschaffung ohne eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs stellt in vielerlei Hinsicht eine besonders nachhaltige Sanierungsmaßnahme dar. Neben dem energetischen Motiv standen die bauphysikalische Planbarkeit und die praxisnahe Ausführbarkeit im Vordergrund des Projekts. Folgende Forschungsfragen waren dabei von Relevanz und wurden im Zuge des Projekts behandelt:

- Ist der Heizwärmebedarf der Souterrainwohnungen gleich groß oder kleiner als die Wärmeverluste durch einen ungenutzten und unkonditionierten Keller?
- Kann ein Kellerbereich mittels feuchte-geregeltem Luftwechsel mit der Außenluft dauerhaft entfeuchtet werden?
- Ist ein Feuchtemanagement für Wohnbereiche mit einer speziellen Lüftungsstrategie möglich?
- Wie realistisch sind Berechnungen bzw. hygrothermische Simulationen in Bezug auf Planbarkeit und Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?
- Welchen Einfluss haben Feuchteemissionen aus den Bauteilen auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?
- Welchen Einfluss hat das Nutzer:innen-Verhalten auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?
- Welchen Einfluss hat das Außenklima auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?

Während der Forschungsarbeit und der Analyse von Mess- und Simulationsdaten entstanden neue Fragen und Hypothesen, die weit über die Ziele von „space4free“ hinausgehen. In den weiteren Ausarbeitungen werden die im Projektantrag behandelten Ziele und Fragen beantwortet. Ungelöste Probleme sind in den Abschnitten 6, Schlussfolgerungen, und 7, Ausblick und Empfehlungen, erörtert.

4 Projektinhalt – Methodik

4.1. Energiebilanz – „space4free“

Wie in der Einleitung und im Abschnitt 3.4, Forschungsfragen beschrieben, besteht ein Grundgedanke des Projekts „space4free“ darin, dass der Wärmebedarf neu errichteter Souterrainwohnungen den ursprünglichen Wärmeverlust durch einen unkontrolliert belüfteten und nicht genutzten Keller nicht übersteigt. Die Methodik dieses Nachweises basiert auf den Ausführungen im Projekt „Sanierungsbauteilkatalog“ [ZEL 17]. Die damals durchgeführten Kellersimulationen wurden im Zuge von „space4free“ mit einem adaptierten Modell wiederholt und an die Klimarandbedingungen sowie an die Materialparameter dieses Projekts angepasst. Ein ungenutzter Keller, der über einen Luftwechsel mit der Außenluft verfügt, wurde simuliert. Aus einer Variation von angenommenen Luftwechselraten wurden der Wärmestrom und in weiterer Folge der spezifische Wärmestrom bezogen auf Quadratmeter und Jahr berechnet.

Die errechneten Werte wurden einerseits mit den Energieausweisen der Souterrain-/Gartenwohnungen in den Objekten Neilreichgasse 3-5 sowie Erlgasse 38 und andererseits mit den realen Verbrauchswerten dieser Wohnungen verglichen. In der Literatur sind zahlreiche Vergleiche von Energieausweisberechnungen mit realen Verbrauchsdaten zu finden. In sämtlichen Publikationen wird nicht der Heizwärmebedarf (HWB), sondern der Endenergiebedarf (EEB) den realen Verbrauchszahlen gegenübergestellt. Methodisch ist ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen eines Energieausweisprogramms und einer realen Verbrauchsabrechnung nicht ganz korrekt. Während im HWB keine Verteilverluste und kein Hilfsstrombedarf abgebildet werden, sind im EEB zwar sämtliche Verteilverluste, aber auch der Warmwasserwärmebedarf inkludiert. Je nachdem, welche Verbrauchsdaten zur Verfügung stehen, ist ein direkter Vergleich demnach schwierig. Im vorliegenden Fall wurde daher nur die Größenordnung des Wärmeverbrauchs verglichen, ohne speziell auf Verteilverluste einzugehen. Da in beiden Gebäuden mit Fernwärme geheizt wird, konnte anhand der Fernwärmeabrechnungen der separat ausgewiesene Wärmeverbrauch für die Raumheizung als Vergleichsgrundlage herangezogen werden.

4.2. Bestandserhebungen

Die Grundlage für die wissenschaftlichen Überlegungen im Projekt „space4free“ liefern Untersuchungen an Bestandsgebäuden vor einer Sanierung. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, sind Kellerbereiche von Gründerzeithäusern in der Regel von aufsteigender Feuchtigkeit, Salzausblühungen und in weiterer Folge von Schimmelpilzbildung betroffen. Eine unkontrollierte Belüftung der Kellerbereiche führt während der Sommermonate zu einer Feuchteanreicherung an den Wandoberflächen und während der Wintermonate zu einem starken Auskühlen der Bauteile.

Gassner & Partner beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der nachhaltigen Sanierung von Gründerzeitkellern. Vor Beginn der Umbauarbeiten an einem Objekt wurden stets gezielte Mauerfeuchtemessungen und Bestimmungen der Salzkonzentration vorgenommen. Einerseits sind solche Untersuchungen Voraussetzung für Förderungsmaßnahmen in der Sanierung und andererseits

bilden sie die Entscheidungsgrundlage, welches Putzsystem verwendet werden kann oder welche begleitenden Mauerwerks-Trockenlegungsmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Die Mauerwerksuntersuchungen erfolgten vor dem Baustart in der Regel durch die Entnahme von Bohrmehlproben in mehreren Bauteiltiefen und an mehreren Stellen im Keller (siehe Abbildung 25). Aus dem Bohrmehl können mittels Darmmethode der Wassergehalt und mittels Ionenchromatografie der Salzgehalt bestimmt werden. Die Untersuchungsverfahren sind in der ÖNORM B 3355 beschrieben.

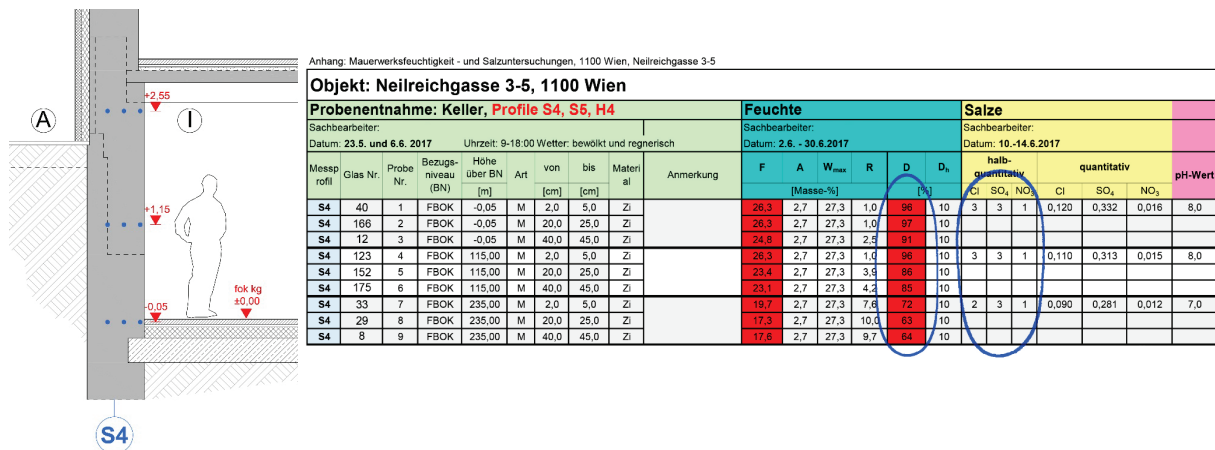


Abbildung 25: Querschnitt durch eine Kelleraußenwand mit Markierung der Bohrmehlentnahmestellen (links); beispielhafte Auswertung der Mauerwerksuntersuchung am Objekt Neilreichgasse mit Durchfeuchtungsgrad und Salzbelastung (blau markiert)

Alternativ zu den Bohrmehlentnahmen wurde eine zerstörungsfreie Methode getestet. Das Messgerät Moist 350 B [MOI 21] verwendet die Mikrowellentechnologie zur Ermittlung der Materialfeuchte. Dabei können unterschiedliche Messköpfe zur Bestimmung der Mauerfeuchte an der Oberfläche (bis 3 cm Tiefe) und in der Wandtiefe (bis 30 cm Tiefe) verwendet werden. Das Messgerät bietet weiters die Möglichkeit, ein in der Messdatenbank hinterlegtes Material auszuwählen. Dies ermöglicht anhand der im Gerät vorprogrammierten Feuchtespeicherfunktion des jeweiligen Materials die Ausgabe des Messwerts als Wassergehalt in Masseprozent bzw. in g/kg des Materials. Wie bei vielen Feuchtemessgeräten üblich, können die Messwerte in Digits angegeben werden, was jedoch nur bei Vergleichsmessungen innerhalb eines Gebäudes oder bei gleichbleibenden Materialien angewendet werden kann. Der Vorteil dieser Messmethode gegenüber der Bohrmehlentnahme ist neben der zerstörungsfreien Untersuchung vor allem die Möglichkeit, sehr schnell eine großflächige Erkundung eines Bauteils durchführen zu können. Die sogenannten Rasterfeuchtemessungen geben beispielsweise Aufschluss über lokale Feuchtebelastungen oder liefern einen Feuchteverlauf infolge aufsteigender Mauerfeuchte. Derartige Messungen an realen Objekten und die Auswertungen der gewonnenen Daten sind in Abschnitt 5.2 angeführt.



Abbildung 26: Feuchtemessgerät Moist 350 B zur Bestimmung der Bauteilfeuchte mittels Mikrowellentechnologie

Ein wesentlicher Aspekt der Bestandsanalyse sind Messungen des Kellerklimas vor der Sanierungsmaßnahme. Gassner & Partner beschäftigte sich bereits vor dem Projekt „space4free“ mit den Klimabedingungen in unsanierten Kellerbereichen und führte Temperatur- und Luftfeuchtemessungen an zwei Standorten durch. Die Daten stammen aus den Jahren 2013 bis 2017 und sind aufgrund lückenhafter Aufzeichnungen nur bedingt interpretierbar. Die Daten wurden mit anderen Vorprojekten, hauptsächlich mit Daten aus dem Sanierungsbauteilkatalog [ZEL 17], verglichen und ausgewertet.

Die Methodik der Bestandserhebungen bietet langfristig betrachtet jedenfalls Vorteile in der Sanierungsplanung. Durch den Vergleich aktueller Mauerwerksuntersuchungen mit den Ergebnissen älterer Projekte kann das Risiko eines Feuchteschadens vorabgeschätzt und es können bestimmte Maßnahmen gesetzt werden. Derzeit ist der Datenbestand noch zu gering bzw. noch unzureichend ausgewertet, um eine realistische Voraussage über die Funktionalität eines bestimmten, mehr oder weniger durchfeuchteten Kellerbereichs aufgrund von Erfahrungswerten treffen zu können.

4.3. Monitoring

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt des Projekts „space4free“ war die Erhebung von Messdaten, um einerseits die grundsätzliche Feuchteproblematik in Kellerbereichen besser erfassen und dokumentieren und andererseits den Zusammenhang des Nutzer:innen-Verhaltens, der Raumlüftung sowie auftretender Feuchteprobleme analysieren zu können. Grundsätzlich sind Raumklimadaten von großem Interesse für Forschung und Qualitätssicherung. Im Zuge des Projekts „space4free“ wurde eine umfangreiche Messdatenbank aufgebaut, die auch über die Projektlaufzeit hinaus aktuelle und zukünftige Monitoringdaten speichert. Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass die Datenanalyse auch für Qualitätssicherungsmaßnahmen von großem Nutzen ist.

4.3.1. Bauteil- und Raumklimamessungen

Bereits ein Jahr vor dem Projektstart von „space4free“ wurde im Objekt „Gebäude A“ ein Bauteilmonitoring zur Analyse von Mauerwerksfeuchte und Baufeuchte installiert. Später wurde ein weiteres Bauteilmonitoring im Objekt „Gebäude B“ zur Bestimmung der Feuchtigkeit in erdberührten Fußbodenaufbauten errichtet. Im Objekt „Gebäude C“ wurde ebenfalls in zwei Souterrainwohnungen ein Monitoring installiert. Hier liegt der Fokus auf dem Raumklima und den Auswirkungen der

Lüftungssteuerung. Alle Monitoringmaßnahmen zielen auf eine langfristige Messdatenaufzeichnung ab, wobei sowohl Bauteildaten zur Bestimmung der Feuchteemissionen und der langfristigen Feuchteverhältnisse in Konstruktionen als auch Raumklimadaten zur Beurteilung des Nutzer:innen-Verhaltens aufgezeichnet werden. Aus diesem Grund sind die realen Gebäudenamen in diesem Bericht anonymisiert dargestellt. Die folgende Tabelle fasst die Gebäude mit Langzeitmonitorings zusammen.

Tabelle 1: Auflistung aller Monitoringobjekte mit automatisierter Langzeitmessung

| Monitoring-Objekte | Messpunkte | Messstart |
|---------------------|------------------------------|--------------------|
| Gebäude A_Wohnung 3 | Raumklima, Bauteile | 1.5.2016 – laufend |
| Gebäude B_Wohnung 1 | Raumklima, Bauteile | 1.7.2018 – laufend |
| Gebäude B_Wohnung 2 | Raumklima, Bauteile | 1.7.2018 – laufend |
| Gebäude C_Wohnung 1 | Raumklima, Lüftungssteuerung | 1.5.2019 – laufend |
| Gebäude C_Wohnung 2 | Raumklima, Lüftungssteuerung | 1.5.2019 – laufend |

Messsysteme

Für die Bauteilmonitorings wird ein spezielles Messsystem, das in einem Vorprojekt am Forschungsbereich Bauphysik der TU Wien entwickelt wurde, eingesetzt. Es basiert auf einem I2C-Bussystem, das sternförmig aufgebaut wird und mit beliebig vielen Knoten eine große Anzahl an Sensorpositionen erreichen kann. Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Sensorik im Vergleich zu vorgefertigten Haustechnik-Bussystemen sehr kostengünstig ist. Außerdem kommen kleine, ca. 1x1 cm große Temperatur-/Luftfeuchtesensoren (Abbildung 27) zum Einsatz, die in Bauteilen bzw. Konstruktionsteilen ideal montiert werden können, ohne eine relevante Wärmebrücke oder eine sonstige Inhomogenität im Bauteil und somit einen Messfehler hervorzurufen. Der Nachteil des I2C-Busses besteht darin, dass die Reichweite der Buskabel gering ist. Für längere Transferleitungen über Wohnungen oder Stockwerke hinweg müssen Messumformer eingebaut werden.



Abbildung 27: I2C-Kombisensor (HYT939) zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit; hier beispielhaft dargestellt an einer Wandoberfläche mit Grobputz; Situation vor der Montage der Innendämmung am Objekt A

Bei den Bauteilmonitorings in den Objekten A und B wurden auch die Raumklimadaten mit diesem Messsystem aufgezeichnet. In allen anderen Objekten, in denen temporäre Raumklimamessungen stattgefunden haben, wurden mobile Datenlogger des Typs Testo 174H oder HOBO U12-O13 eingesetzt. Beide Datenlogger messen die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit am Gerät und wurden in der Regel an Einrichtungsgegenständen in den untersuchten Wohnungen platziert.

4.3.2. Lüftungsanlagenmonitoring

Zwei verschiedene Anlagenmonitorings wurden durchgeführt. In einer ersten, einfachen Variante wurden bei den Lüftungsgeräten die Regelzustände der vorgeschalteten Feuchtesteuerung geloggt. Die Feuchtesteuerung vergleicht die absolute Innenraumluftfeuchte mit der Außenluftfeuchte und entscheidet, ob eine Lüftungsfreigabe erfolgt. Die Datenaufzeichnung erfolgte lokal mittels integriertem Datenlogger der Feuchtesteuerung und musste manuell ausgelesen werden. Sämtliche Feuchtesteuernngen, die sowohl in Wohnungen als auch in Lagerkellern eingebaut wurden, liefern umfangreiche Messdaten von Innen- und Außenklima sowie von den dazugehörigen Lüftungszuständen.

Die zweite Variante des Anlagenmonitorings wurde in zwei Wohnungen im Gebäude C angewandt. In diesem Objekt befinden sich die Prototypen der „intelligenten Lüftungssteuerung“ (im Weiteren „Intelligent Automatic“ oder „IA“ genannt), die über eine Modbus-Schnittstelle mit dem Lüftungsgerät kommunizieren. Es werden laufend aktuelle Lüftungsdaten ausgelesen, Klimadaten der Raumluft und der Außenluft verglichen und nach einem Entscheidungsbaum ausgewählte Parameter an das Lüftungsgerät zurückgegeben. Die Lüftungsstrategien werden in Abschnitt 4.5 erläutert.

4.3.3. Datenspeicherung und Datenauswertung

Die automatisierten Bauteil- und Raumklimamessungen sowie die Anlagenmonitorings mit IA speichern die Messdaten im Minutenintervall. Die Daten werden jeweils in einer Datei gesammelt und einmal täglich via E-Mail an eine E-Mail-Adresse bei Gassner & Partner geschickt. Gassner & Partner betreibt einen eigenen Messdatenserver mit einer speziellen Messdatenbank zur Speicherung, Sortierung und Analyse der Messdaten. Dieser Messdatenserver liest die täglich empfangenen Daten-E-Mails der einzelnen Monitoring-Objekte ein und speichert die Daten in den jeweiligen Projekten ab. Dadurch ist eine vollautomatische Erfassung der Messdaten möglich. Die Kontrolle der Daten erfolgt ebenfalls automatisiert über eine tägliche Abfrage und Analyse der letzten Datensätze. Somit können Ausfälle von Datenloggern spätestens nach einem Tag festgestellt werden.

Die Auswertung der Messdaten erfolgt entweder grafisch über ein Webinterface in einem beliebigen Browser oder über eine Excelabfrage direkt aus der Datenbank. Dabei können Originaldaten oder gemittelte Werte abgefragt werden. Die weiteren Auswertungen erfolgen unabhängig von der Datenbank in einem Tabellenkalkulationsprogramm.

4.4. Labormessungen

4.4.1. Betrachtete Materialien

Im aktuellen Projekt, in dem Materialparameter auch messtechnisch erfasst werden sollten, war der Verbund aus Gründerzeitziegeln und Diffupor®-Verputz die hygrothermisch relevante Bauteilschichte des Wandbildners.

1. Für den Gründerzeitziegel liegen Anhaltswerte aus Versuchen vor, sie können von der „MASEA-Materialdatenbank“ [MAS 21] online abgerufen werden.
2. Für den Diffupor®-Verputz liegen Angaben des Herstellers (Produktdatenblatt) vor.

Um die Parameter auch auf Basis eigener Messungen zu ermitteln, wurden folgende drei Typen von Messungen durchgeführt:

1. Saugversuch durch vollständiges Eintauchen -> Daraus wurde die *freie Wassersättigung* ermittelt.
2. Aufsaugversuch durch teilweises Eintauchen -> Daraus ergab sich der *Wasseraufnahmekoeffizient*.
3. Trocknungsversuch -> Daraus wurde eine Verlaufskurve des Gesamtwassergehalts der Probe während der Trocknung („*Trocknungskurve*“) bestimmt.

Die Versuche wurden größtenteils im Rahmen einer BAC-Arbeit (nicht abgeschlossen) durch Herrn Sascha Zeiler durchgeführt und erstausgewertet.

4.4.2. Wesentliche Materialdaten für eine hygrothermische Simulation

Die für die Simulation wesentlichen Materialdaten können in thermische und hygrische Daten unterteilt werden.

Thermisch relevante Materialdaten bestimmen die Vorgänge der Wärmeleitung und -speicherung. Sie umfassen

1. die feuchteabhängige *Wärmeleitfähigkeit*. Die Feuchteabhängigkeit wird über eine Formel zwischen zwei Funktionsstützstellen approximiert. An diesen Stellen ist die Wärmeleitfähigkeit bekannt, nämlich bei 0% Feuchtegehalt und bei freier Wassersättigung.
2. für die Wärmespeicherung die spezifische *Wärmekapazität* und die *Rohdichte*.

Hygrische Parameter bestimmen die Feuchtespeicherung sowie den Feuchtetransport, der über Dampfdiffusion und kapillare Leitung zustande kommt. Diese Daten umfassen

1. für die Dampfdiffusion: Bauteilbezogen die feuchteabhängige diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (sd-Wert) bzw. rein materialbezogen die *feuchteabhängige Diffusionswiderstandszahl*. Die Feuchteabhängigkeit wird über eine Interpolation zwischen Funktionsstützstellen bei 25%, 80% und 100% relativer Luftfeuchte approximiert.
2. für den Flüssigwassertransport (Kapillarleitung) eine doppellogarithmische Kurve, die die Abhängigkeit der Flüssigkeitsleitfähigkeit (siehe dazu Abschnitt 4.4.4) von der Saugspannung angibt.

3. für die Feuchtespeicherung die *Feuchtespeicherfunktion*, bei der verwendeten Software HAM4D_VIE als Angabe, welcher Wassergehalt bei welcher Saugspannung vorliegt („Saugspannungskurve“). Dieser Zusammenhang wird über eine Formel approximiert, in die die freie Wassersättigung, die Saugspannung bei 0% Wassergehalt und ein Parameter, der die Porenradienverteilung charakterisiert, eingehen.

Die *Luftpermeabilität*, also die Luftdurchlässigkeit, die bei Anliegen von Druckdifferenzen flächig homogene Luftdurchströmungen bewirkt, wurde im aktuellen Projekt nicht betrachtet. Die Permeabilität ist für leicht durchströmbare Stoffe wie Mineralwolle und bei diesen vor allem für Strömungen in Spalten aus dem Innenraum in kalte Bereiche, z. B. zu Balkenköpfen, relevant [ZEL 17].

4.4.3. Wassertransport über Diffusion

Die normkonforme Bestimmung der Dampfdiffusionswiderstandszahl erfolgt für Baustoffe und Bauprodukte im Allgemeinen gemäß DIN EN ISO 12572 und speziell für Putze gemäß DIN EN 1015-19. Das Verfahren wurde z. B. in [VRA 21] zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes von Estrichen herangezogen. Im Projekt wurde dieses Verfahren aufgrund des messtechnischen Aufwands nicht eingesetzt, sondern die Methode des „Curve Fittings“ (siehe Abschnitt 4.4.5).

4.4.4. Wassertransport über Flüssigkeitsleitung (Kapillarleitung)

Die Flüssigkeitsleitung kommt aufgrund des Kapillareffekts zustande und ist ein, verglichen mit der Diffusion, sehr leistungsfähiger Transportmechanismus. Zu entsprechenden Berechnungen wird ein für die rechnerische Ermittlung von Stoff- und Energieströmen üblicher Gleichungsansatz herangezogen: Dabei wird der Transport durch ein „Potential“, also eine treibende Kraft, verursacht. Die zu berechnende Größe, eine flächenspezifische Stromdichte, hängt vom Potentialgradienten ab, also dem lokalen „Gefälle“. Welche Stromdichte bei welchem Potentialgradienten zustande kommt, also die Wirkstärke des Potentials, wird durch einen Proportionalitätsfaktor zwischen Stromdichte und Gradienten ausgedrückt. Für die Flüssigkeitsleitung wird als Potential üblicherweise entweder der Wassergehalt oder die Saugspannung herangezogen (ÖNORM EN 15026). In der verwendeten Software HAM4D_VIE wird als Potential gemäß der dem Kapillartransport eigentlich zugrunde liegenden physikalischen Wirkung die Saugspannung gewählt. Die Besonderheit des Potentialberechnungsansatzes bei der Flüssigkeitsleitung liegt darin, dass der Proportionalitätsfaktor nicht wie bei vielen anderen Phänomenen eine Konstante oder zumindest annähernd konstant ist, sondern selbst wieder vom Potential abhängt. Diese Abhängigkeit der Flüssigkeitsleitzahl, die in der Literatur auch als Diffusivität bezeichnet wird, von der Saugspannung ist sogar besonders stark ([DES 97], S. 19), sodass zur ausreichend deutlichen Darstellung dieser Abhängigkeit in einem Diagramm meist ein doppellogarithmisches Achsensystem gewählt werden muss.

4.4.5. Versuch der Bestimmung von Materialparametern über „Curve Fitting“

Der Ansatz des „Curve Fittings“ versucht, erforderliche Parameter, die nicht bereits aus anderen Quellen bekannt sind, durch einen Abgleich zwischen Messung und Simulation (oder analytischer Berechnung) zu bestimmen. Die für die Simulation gewählten Materialparameter beeinflussen über die entsprechenden (Differential-)Gleichungen die Simulationsergebnisse. Bei n unbekanntem

gesuchten Materialparametern sind mindestens n Messwerte erforderlich, um eine Parameterbestimmung möglich zu machen.

Eine ausreichende Anzahl an Messwerten kann z. B. erzeugt werden, indem die zeitliche Entwicklung einer einzigen Messgröße im Zuge eines instationären Vorgangs gemessen wird. Voraussetzung ist, dass der zeitliche Verlauf, also die Kurvenform, durch jeden der gesuchten Materialparameter ausreichend stark beeinflusst wird. Man wählt dann Messintervall und -dauer so, dass genügend Einzelwerte, die zeitlich ausreichend dicht beieinander liegen, erzeugt werden. Ein solcher, aufgrund seiner einfachen Durchführung bewährter, instationärer Vorgang ist die Trocknung eines Versuchskörpers. Die bislang exakteste Methode, die Abhängigkeit der Flüssigkeitsleitfähigkeit von der Saugspannung für Baustoffe experimentell zu bestimmen, ist die Kernresonanz-Spektroskopie (engl. Nuclear Magnetic Resonance, kurz: NMR, [NMR 95]). Diese Methode wurde für Baustoffe erstmals in [KRU 95] angewandt. Dabei wird über Kernspinresonanz die zeitliche Veränderung des Wassergehaltprofils in Versuchskörpern bestimmt und die Abhängigkeit der Flüssigkeitsleitfähigkeit vom Wassergehalt bzw. von der Saugspannung entsprechend angepasst.

Ein ebenfalls approximatives Verfahren, das auch Ergebnisse eines Trocknungsversuchs einschließt, ist in [HOL 01], S. 35 ff., im Abschnitt „Approximationsmethoden für Stoffeigenschaften“ beschrieben. In [BED 00], S. 52 werden zwei weitere Approximationsmethoden vorgestellt. Durch Anpassen von Parametern, die die Abhängigkeit der Flüssigkeitsleitfähigkeit und der feuchteabhängigen Diffusionswiderstandszahl vom Feuchtegehalt angeben, wurde auch im aktuellen Projekt versucht, gemessene und simulierte Trocknungskurven weitgehend zur Deckung zu bringen.

Ein für die Software HAM4D_VIE grundlegender Gleichungssatz zu Feuchtetransport und -speicherung sowie der Einfluss der diese Gleichungen bestimmenden Parameter auf den Trocknungsverlauf ist in [BED 00] dargestellt. Die Ergebnisse werden hier bei der Methodik vorweggenommen: Es stellte sich letztlich heraus, dass für den Ansatz noch entsprechende Ausführungsgrundlagen fehlen, so z. B. ein nachvollziehbares Kriterium, ab wann die Kurvendekung Messung – Simulation ausreichend ist. Überdies ist noch kein Verfahren festgelegt, wie vorzugehen ist, wenn mehrere Lösungen vorliegen, also mehrere Parameterkombinationen, die alle zu einer akzeptablen Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung führen.

4.4.6. Aufsaugversuch – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde in weitgehender Anlehnung an die entsprechende Norm DIN EN ISO 15148 ermittelt. Nach der Anlieferung wurden die Verbundproben im Labor der TU Wien mehrere Wochen in einer konditionierten Werkhalle gelagert. Kurz vor dem Aufsaugversuch wurden die Proben an den Flanken mit Küchenfolie umwickelt, um die Diffusion (= Trocknung) über die Flanken zu minimieren, wobei gleichzeitig darauf geachtet wurde, keine Kapillarwirkung über den Spalt zwischen Folie und Probe zu erzeugen. Die Proben wurden – durch ein Metallgitterpodest vom Behälterboden getrennt – ca. 5mm tief in Wasser gestellt. In festgelegten Zeitabständen, die mit der Zeit anstiegen, wurden die Proben aus dem Wasserbad genommen, das Haftwasser abgetupft und die Proben mit einer Feinwaage verwogen.

Aufgrund der Bestimmungsgleichung für den Wasseraufnahmekoeffizienten wird die flächenspezifisch kumuliert aufgenommene Wassermasse (y -Achse) über der Wurzel aus der Zeit (x -Achse) aufgetragen. Bei dieser Darstellungsweise verläuft die Kurve mehr oder weniger als ansteigende Gerade. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist als Steigung dieser Geraden definiert.

Aufgrund des Materialverbunds zwischen Ziegel und Putz ergibt sich im zeitlichen Verlauf des Gesamtwassergehalts ein Knick, siehe Abbildung 79. Dieser Knick unterscheidet sich in seiner Ursache von dem Knick bekannter Verlaufskurven reiner Ziegelproben. Er entsteht bei Verbundproben, sobald die Hauptfeuchtefront des hochsteigenden Wassers die Grenzfläche zwischen Ziegel und Putz erreicht, denn dort trifft das im Ziegel rasch hochgesogene Wasser auf den Putz. Der Diffupor®-Putz ist, wie praktisch alle Sanierputze (vgl. [MEI 21]), viel weniger saugend als Ziegel. Mit geringerer Saugwirkung ab Erreichen der Grenzfläche sinkt die Steiggeschwindigkeit schlagartig.

4.4.7. Bestimmung der freien Wassersättigung

Für die Vorbereitung des anschließenden Trocknungsversuchs wurde der Zustand der freien Wassersättigung bei den Proben erreicht. Die freie Wassersättigung ist jener Wassergehalt, der sich bei druckloser (= atmosphärischer) Lagerung der Proben als Gleichgewicht einstellt. Ein übliches Abbruchkriterium für den Versuch und damit für die Definition einer ausreichenden Massekonstanz ist ein Zustand, bei dem sich die Masse des in destilliertem Wasser gelagerten Probekörpers innerhalb von 24 h um nicht mehr als 0,1 % ändert. Bei den beobachteten Verbundproben konnte dieser Zustand in der Regel nach sechs Tagen erreicht werden.

4.4.8. Trocknungsversuch

Die Trocknung orientierte sich an keinem normativen Verfahren. Wesentlich waren vielmehr während der Trocknung konstante Randbedingungen, sodass diese in der zugehörigen Simulation abgebildet werden konnten. Die Grundlagen der Trocknung und der typische Zeitverlauf der Massenabnahme („Krischer'sche Trocknungskurve“, „Krischer'scher Knickpunkt“) sind eingehend in [KRI 63] beschrieben. Der Einfluss von Materialparametern auf den Trocknungsverlauf dreier, über Parameter beschriebener unterschiedlicher Baustoffe („fein“, „mittel“, „grob“) ist samt dem zugehörigen Differentialgleichungssatz in [BED 00], S. 52 ff., dargestellt.

Wesentliche Ergebnisse des Trocknungsversuchs sind

1. die Steigungen der Verlaufskurve des Massegehalts und
2. die Lage sogenannter Knickpunkte in der Verlaufskurve. Diese Punkte zeigen den Übergang deutlich unterscheidbarer Trocknungsphasen an, wobei ihre Lage ausschließlich von der Flüssigkeitsleitfähigkeit, nicht aber von der Diffusionswiderstandszahl abhängt ([BED 00]).

Für die Versuchsdurchführung wurden die Proben nach Erreichen der freien Wassersättigung (Vorkonditionierung) in einem Klimaraum bei konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchte gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen. Das Ergebnis war ein gemessener Verlauf einer Trocknungskurve. Diesem Verlauf wurde die entsprechende hygrothermische Simulation gegenübergestellt.

4.5. Analyse von Lüftungsstrategien

4.5.1. Anforderungen an die Lüftung

Das Hauptziel der Lüftung ist, einen hygienischen Luftwechsel zu gewährleisten. Spätestens seit 1858, seit der Publikation des deutschen Hygienikers Max von Pettenkofer [PET 58] ist bekannt, dass die CO₂-Konzentration ein guter Indikator für die Luftqualität in Räumen ist und hauptsächlich von menschlichen Emissionen bestimmt wird. Der CO₂-Wert sollte laut Pettenkofer 1000 ppm nicht überschreiten. Im Laufe der ca. 160 Jahre seit Pettenkofer ist die CO₂-Außenluftkonzentration signifikant gestiegen und steigt weiter. Daher ist heute nicht mehr ein Absolutwert, sondern eine maximale Differenz zwischen Innen- und Außenluftkonzentration für die Beurteilung der Raumluftqualität maßgeblich. Diese Differenz wird auch in der Norm der entsprechenden Anlagenregelung herangezogen (Tabelle B.12, „Auslegungswert der CO₂-Konzentrationen in belegten Wohn- und Schlafzimmern“ in Anhang B3.2, „Standardmäßige Auslegungs-Außenluftvolumenströme für Wohngebäude“ der EN 16798-1).

Speziell im Kellerbereich ist auch eine mögliche Radonbelastung zu berücksichtigen, vor allem, wenn die erforderliche Luftdichtheit der Gebäudehülle und in Folge auch der Sollluftwechsel festgelegt werden. Eine Radonbelastung als Lüftungskriterium wurde im Projekt allerdings nicht berücksichtigt, da Wien als betrachtete Projektregion gemäß der „österreichischen Radonkarte“ [GEO 21] nicht im für Bodenradon gefährdeten Bereich liegt. Nennenswerte Radongehalte in den Baumaterialien, z. B. in Natursteinen als weitere mögliche Radonquelle, wurden nicht betrachtet.

Weiters gelangen aus Baustoffen Emissionen in die Raumluft, die abgelüftet werden müssen. Aus diesem Grund sollte die Lüftung in Räumen, die von Menschen genutzt werden, nie vollständig abgeschaltet werden. Dies wird als Grundluftwechsel bezeichnet und sichert auch eine Mindestentfeuchtung. In der ÖNORM H 6038, S. 16 wird ein minimaler Raumluftwechsel von 0,15/h gefordert. Ein fehlender Grundluftwechsel führte bei einem der dokumentierten Schadensfälle zu einem Feuchteschaden (siehe Seite 30).

4.5.2. Mechanische Lüftung

Grundsätzlich kann die tägliche Anwesenheit des Mieters in der Wohnung zum Zweck des Stoßlüftens nicht verlangt werden. Im *Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden* [SCH 19] heißt es:

„Nach der Judikatur kann eine tägliche Anwesenheit des Mieters in der Wohnung zum Zweck des Stoßlüftens aufgrund der Berufstätigkeit des Mieters nicht erwartet werden. Auch das gepflogene Lüftungsintensive Wohnverhalten, Lüften im Ausmaß von je 10 Minuten morgens und abends („Durchzug“), das Bad nach Benützung sowie das Schlafzimmer die ganze Nacht hindurch, kann nicht verlangt werden.“

Verschärfend kommt hinzu, dass im Keller aufgrund der erdberührten Bauteile üblicherweise eine verglichen mit anderen Nutzungseinheiten erhöhte Feuchtebelastung vorliegt, weil

1. über die erdberührten Bauteile ein Feuchtetransport vom Erdreich (Bodenfeuchte) nach innen erfolgen kann,

2. erdberührte Bauteile kühler sind und es leichter zur Kondensation der Rauminnenluft, vor allem an raumseitigen Bauteiloberflächen, evtl. aber auch in Hohlräumen, kommen kann,
3. eventuell die Luftdichtheit der Nutzungseinheit höher ist und ein nutzerunabhängiger Grundluftwechsel über Infiltration vergleichsweise gering ist,
4. in vielen Fällen kein nennenswerter thermischer Auftrieb zu erwarten ist, da die Raumhöhen bzw. der Luftverbund mit darüberliegenden Geschoßen gering ist.

Abgesehen von der rein rechtlichen Lage reduziert die mechanische Lüftung bei entsprechender Steuerung jedenfalls das Risiko eines Feuchteschadens und bietet den Nutzer:innen den Komfort einer vom Nutzer:innen-Verhalten unabhängig guten Luftqualität. Gemäß Projektantrag lag die Zielsetzung daher darin, in den Kellerwohnungen eine mechanische Lüftung einzusetzen und feuchtetechnisch nicht von einer allfälligen Fensterlüftung abhängig zu sein, die ebenfalls möglich ist.

Folgende Varianten einer mechanischen Lüftung sind im Wohnbau üblich:

1. Reine Abluftanlage: Hier sind ausreichende Nachströmöffnungen wichtig.
2. Zuluft-Abluft-Anlage: Hier ist die Wärmerückgewinnung leicht möglich.
3. Reine Zuluft-Anlage: Im Projekt nicht betrachtet, da in Österreich nicht üblich (schadensanfällig).
4. Mechanische Fensterlüftungssteuerung: Diese Variante wird z. B. in DIN 1946-6-5:2015, S. 20 am Rande erwähnt. Sie wird – soweit bekannt – in Österreich bislang vorwiegend im Schulbau, konkret in Klassen eingesetzt und wurde im Projekt nicht betrachtet.

Ausführungen zum Einsatz mechanischer Lüftungen siehe z. B. [REI 96], [NOW 96], [PAU 14] und [RIE 08], Lüftungssysteme speziell in der Sanierung finden sich z. B. in [ENE 12].

4.5.3. Auslegung einer Lüftungsanlage bei Wohnungsnutzung

In Österreich steht für die Auslegung von Lüftungsanlagen für Wohngebäude neben der europäischen Normenserie 16798-xx die nationale ÖNORM H 6038 zur Verfügung.

Während es früher üblich war, die erforderlichen Volumenströme nach dem sogenannten Luftwechsel festzulegen, also dem pro Zeiteinheit ausgetauschten Luftvolumen bezogen auf das belüftete Volumen, ist seit 2014, dem Erstausgabjahr der aktuellen ÖNORM H 6038, festgelegt, dass nach der zur erwartenden Personendichte (Belegung) auszulegen ist. Dies steht im Einklang mit der EN 16798-1:2021. Der Ansatz entspricht dem Umstand, dass die Beeinträchtigung der Luftqualität nicht dem zu belüftenden Luftvolumen, sondern den anwesenden Personen, ihrer Aktivität und ihrer Anwesenheitsdauer proportional ist. Erst unter Zugrundelegung üblicher Belegungsdichten und Raumhöhen korrelieren Luftvolumen bzw. Nettonutzfläche mit den menschlichen Emissionen.

4.5.4. Feuchteeintrag durch Lüftung vs. Sicherstellung der Hygiene

Zwischen der hygienischen und der feuchtebezogenen Anforderung kann es zu Zielkonflikten kommen. Dies ist vor allem bei höheren absoluten Außenluftfeuchten und damit bei höheren Außenlufttemperaturen, vor allem im Sommer und in den Übergangszeiten, im Frühjahr und im Herbst, der Fall: Wenn es außen absolut feuchter ist, führt das Lüften zu einem Nettofeuchteintrag in das Gebäudeinnere. Im Beiblatt zur DIN 1946-6-5, S. 17 heißt es: „*Unter typischen Randbedingungen*

(Deutschland, mittlere Werte) kann in den Monaten Juli bis September davon ausgegangen werden, dass ein positives Trocknungspotenzial im Keller nur in weniger als 10% des gesamten Zeitraums möglich ist.“ Das Beiblatt enthält auf Seite 35 einen „Ablaufplan Sanierung“ in Form eines Entscheidungsprozessschemas (inkl. freier Lüftung, also Fenster- und Schachtlüftung), wobei auch die Nutzungsart „Wohnen“ abgedeckt ist. Das Schema ist aber explizit für den Winterauslegungsfall konzipiert. Für den Sommerfall empfiehlt das Beiblatt eine sensorgesteuerte Lüftung bei „feuchtekritischen Verhältnissen“, es ist überdies zu überprüfen, ob der Einsatz eines dezentralen Entfeuchtungsgeräts sinnvoll ist. Der Ansatz einer feuchtegesteuerten Lüftung wurde auch im Projekt „space4free“ verfolgt.

4.5.5. Minimierung des Luftwechsels ohne Beeinträchtigung der Lüftungsleistung

Um eine bestimmte Luftqualität zu erreichen, ist bei vorgegebenen Schadstoffquellen ein minimaler Luftwechsel erforderlich. Dieser minimale Luftwechsel wäre das Optimum. Das Ausmaß, wie nahe man diesem Optimum kommt, wird als *Lüftungseffektivität* bezeichnet. Sie ist als Quotient aus zwei Differenzen definiert: einerseits der Differenz aus der Schadstoffkonzentration in der Abluft (Zähler des Quotienten) und der Schadstoffkonzentration in der Zuluft (Nenner des Quotienten), andererseits der Differenz aus der Schadstoffkonzentration in der Aufenthaltszone und der Schadstoffkonzentration in der Zuluft ([REI 96], S. 193).

Die Lüftungseffektivität hängt vor allem von der Luftführung ab: Im Idealfall nimmt die Zuluft, die über die Zuluftventile in das Rauminnere eintritt, auf ihrem Weg zu den Abluftventilen ein Maximum an Schadstoffen mit. Im schlechtesten Fall entsteht eine „Kurzschlussströmung“, d. h., eintretende, nicht schadstoffbelastete Zuluft wird über Abluftventile wieder abgesaugt, ohne zuvor nennenswert Schadstoffe aus der Raumluft aufgenommen zu haben. Diese Gefahr besteht vor allem beim Einsatz von Weitwurfdüsen als Zuluftventile, kombiniert mit Abluftventilen im selben Raum, die auf gleicher Höhe und an gegenüberliegenden Wänden platziert sind.

Für eine Maximierung der Lüftungseffektivität sind daher Feuchte und Schadstoffe durch Lüften zu entfernen. Dies sollte über Abluftventile erfolgen, die möglichst nahe am Entstehungsort der Schadstoffe bzw. Feuchtequellen platziert sind. Typische Feuchtebelastungsspitzen entstehen in Bad, Küche und Schlafzimmer, wobei letzteres jedoch nicht als Abluftraum geplant wird.

Feuchte und Schadstoffe sollten weitestgehend während oder unmittelbar nach ihrer Entstehung abgeführt werden (z. B. die Feuchte im Bad nach einer Dusche durch Fensterlüften oder Betätigen eines Tasters vor Duschbeginn, um einen nachlaufgesteuerten Abluftventilator zu aktivieren). Die Zuluft kann über ein kaskadisches Durchströmen der Nutzungseinheit mehrfach genutzt werden [SIB 2013].

Auf diesen Möglichkeiten und Erfordernissen gründet das verbreitete Luftführungskonzept, eine Nutzungseinheit in Zuluft-, Abluft- und Überströmräume einzuteilen (ÖNORM H 6038). In der Nutzungseinheit entsteht eine gerichtete Strömung von Zuluft (Einbringung der Zuluft) über die Überströmräume bzw. -zonen in die Ablufträume. Druckdifferenzen in der Größenordnung weniger Pascal zwischen den Räumen stellen sich je nach Betriebsluftvolumenstrom und Öffnungszustand der Türen (-> Strömungswiderstand) entsprechend ein.

Um ein optimales Raumklima zu erreichen (v.a. im Schlafzimmer und in den Aufenthaltsräumen), ist es sinnvoll, raumweise Zuluft- und Abluftöffnungen vorzusehen.

4.5.6. Typische Feuchtequellen

Feuchtequellen im Keller umfassen:

1. Feuchteemissionen aus Bauteilen, darunter aufsteigende Feuchte, einsickerndes Grundwasser nach Starkregenereignissen sowie die Anfangsbaufeuchte während und unmittelbar nach der Kellersanierung,
2. Feuchte aus der Außenluft über das Belüften der Nutzungseinheit,
3. Feuchte aus menschlichen Aktivitäten, der Tierhaltung und aus Pflanzen.

4.5.7. Obere Grenze für den Luftwechsel

Im Bestreben, das Trocknungspotenzial der Außenluft maximal auszunutzen, ist eine obere Grenze für den Luftwechsel zu beachten, die durch folgende Randbedingungen bestimmt wird:

1. *Behaglichkeit*: Eine zu hohe Luftgeschwindigkeit erhöht vor allem im Sommer bei zu niedrigen Einblastemperaturen an unbedeckten Stellen (Nacken, Knöchel) das Risiko für lokale Unbehaglichkeit, d. h. für ein Zugluftempfinden (ÖNORM EN 7730).
2. *Strombedarf versus Wärmeverluste*: Der Strombedarf steigt bei gegebener Anlagenkonfiguration quadratisch mit dem Luftvolumenstrom (gefördertes Luftvolumen pro Zeiteinheit). Dabei sind vor allem die Leitungsquerschnitte, -längen und der Widerstand von Einbauteilen wie Schalldämpfern entscheidend. Eine Faustregel besagt, dass die Einsparung an Heizwärme durch eine Lüftungsanlage in etwa zehn- bis fünfzehnmal höher ist als der entsprechende, verglichen mit der Fensterlüftung zusätzliche Strombedarf aus Gründen der Energieeffizienz sein sollte.

4.6. Hygrothermische Simulation

Eine weitere Methode neben realen Messungen war die hygrothermische Simulation einer Wohneinheit. Diese hat im Vergleich zum Monitoring verschiedene Vorteile:

- Betrachtung des eingeschwungenen Zustands: Da das Sanierungskonzept an sich untersucht werden soll, ist die Fragestellung interessant, ob das Konzept auf lange Sicht funktioniert. Die Simulation ermöglicht beispielsweise die Annahme, dass eine Wohnung seit zehn Jahren bewohnt wird, um dann das zehnte Jahr zu analysieren. Bei den Monitoring-Projekten können bislang nur die ersten Jahre nach der Sanierung untersucht werden.
- Verfügbarkeit von Ergebnissen an allen Stellen des Modells: Während beim Monitoring nur dort Informationen gesammelt werden können, wo ein Sensor verbaut wurde, erzielt die Simulation Ergebnisse an jeder Stelle der betrachteten Wohnung. Das inkludiert auch unzugängliche Stellen tief im Mauerwerk.
- Verfügbarkeit von schwer zu erhebenden physikalischen Größen: Die Wärmestromdichte und die Feuchtestromdichte sind nicht oder nur mit erheblichem technischem Aufwand messbar. In der Simulation sind sie jedoch auswertbare Ergebnisse und ermöglichen eine Erstellung von Wärme- und Feuchtebilanz der Wohneinheit.

Als Nachteil der Simulation gegenüber dem Monitoring ist vor allem erwähnenswert, dass es nicht möglich ist, alle benötigten Eingangsparameter messtechnisch zu bestimmen. Daher sind viele Annahmen notwendig, die, wenn sie nicht der Realität entsprechen, die Ergebnisse verfälschen. Darüber hinaus werden bei der Simulation Vereinfachungen getroffen, um das physikalische Problem berechenbar zu machen.

Für die Simulationen wurde das an der TU Wien entwickelte Programm HAM4D_VIE verwendet. Dieses implementiert Bauteilsimulationen im Sinne der ÖNORM EN 15026 und wurde bereits in einigen Vorprojekten (z.B. [ZEL 17]) verwendet.

Es wurden Varianten mit unterschiedlichen Soll-Innentemperaturen und unterschiedlich leistungsfähigen Lüftungsanlagen simuliert. Als Ausgangspunkt wurde die Variante mit einer Soll-Innentemperatur von 22°C und einer Luftwechselzahl von 0,6/h gewählt. Davon abweichend wurden Varianten mit anderen Temperaturen (20°C, 24°C) und anderen Luftwechselzahlen (0,4/h, 1,0/h, 2,0/h) simuliert. Die Simulationsvarianten sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die hier angeführten Bezeichnungen wurden auch in den Diagrammdarstellungen des vorliegenden Berichts herangezogen.

Tabelle 2: Simulationsvarianten

| Bezeichnung | Soll-Innentemperatur in °C | maximaler Luftwechsel in 1/h |
|-------------|----------------------------|------------------------------|
| 20°C | 20 | 0,6 |
| 22°C | 22 | 0,6 |
| 24°C | 24 | 0,6 |
| 0,4/h | 22 | 0,4 |
| 1,0/h | 22 | 1 |
| 2,0/h | 22 | 2 |

4.6.1. Simulationsprogramm HAM4D_VIE

HAM4D_VIE ist ein Simulationsprogramm zur hygrothermischen Bauteilsimulation, das am Forschungsbereich Bauphysik der TU Wien entwickelt wurde [BED 00]. Es verwendet die Finite-Volumen-Methode sowie ein zeitadaptives Runge-Kutta-Verfahren.

Zu Beginn wird ein geometrisches Modell aus achsenparallelen Quadern aufgebaut. Dieses Modell wird in Volumselemente zerteilt, die für die jeweilige Anwendung hinreichend klein gewählt werden. Die geometrische Modellierung ist im Detail im Abschnitt 4.6.2 beschrieben.

Es werden Anfangs- und Randbedingungen definiert (siehe Abschnitt 4.6.5). Dadurch können in einem Finite-Volumen-Verfahren für jedes Volumselement des Modells die Ableitungen von Temperatur und Feuchtegehalt nach der Zeit berechnet werden. Die Simulation der Wohneinheit wird durch angenommene innere Lasten (siehe Abschnitt 4.6.4) und die gewählte Lüftungsstrategie (siehe Abschnitt 4.5) realisiert. Die Temperierung erfolgt über eine Beheizung der Raumluft, die jeweils bei Unterschreitung einer gewählten Solltemperatur aktiv wird. Es wird keine Kühlungsmöglichkeit vorgesehen.

4.6.2. Geometrische Modellierung

Für die Variantenstudie der hygrothermischen Simulation wurde die Wohnung 1 im Gebäude B modelliert (siehe Abbildung 28). Der Rechenaufwand für eine dynamische Simulation einer ganzen Wohneinheit über den Zeitraum von zehn Jahren ist beträchtlich. Daher sind gewisse Vereinfachungen des Modells erforderlich, um die Rechenzeit in einem akzeptablen Rahmen zu halten.

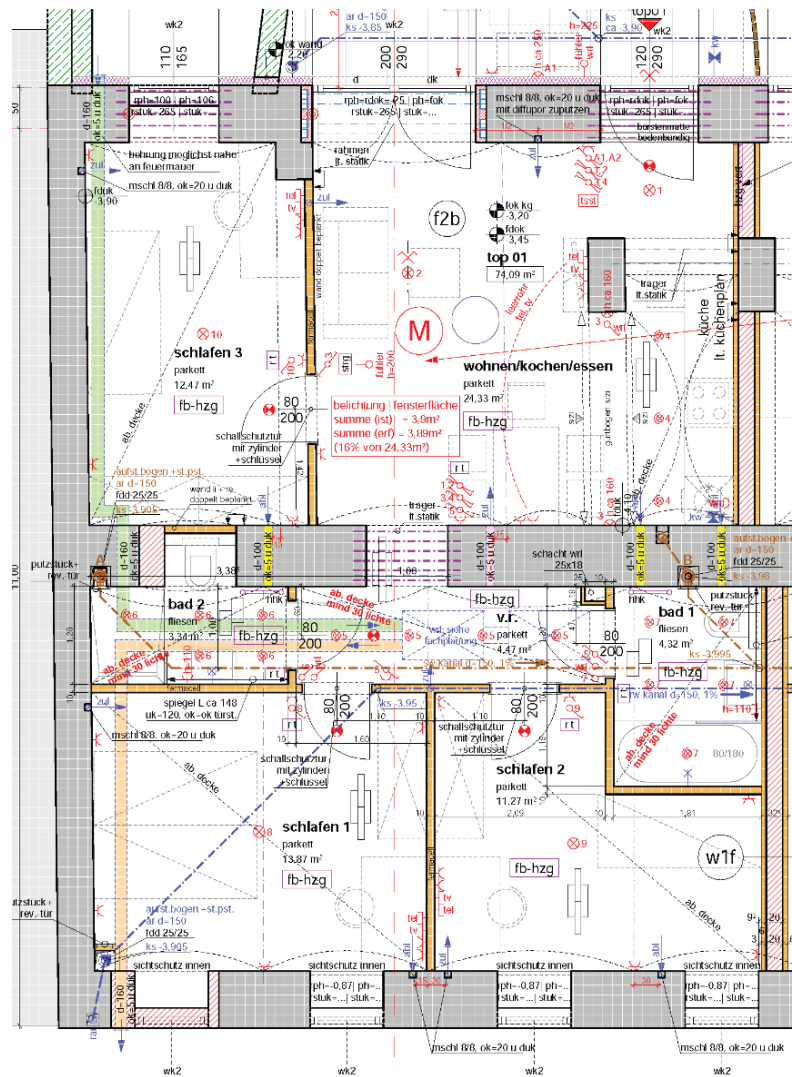


Abbildung 28: Plandarstellung der Wohneinheit

Die wichtigste Vereinfachung ist die Modellierung der Bauteile, insbesondere der Wände, als abgewinkelte Flächen, um die Anzahl der Volumenelemente überschaubar zu halten. Es werden dabei alle umschließenden Bauteile (Decke, Boden, Wände) mit konstantem Querschnitt modelliert. Dieser Querschnitt wird mit einer räumlichen Tiefe angenommen, die sich daraus ergibt, dass die Fläche, mit der der Bauteil die Luft der Wohneinheit berührt, unverändert bleibt. Dies soll gewährleisten, dass die Interaktion des Bauteils mit der Luft der Wohneinheit so wenig wie möglich verändert wird.

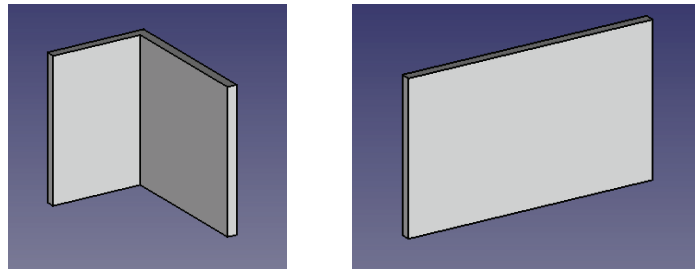


Abbildung 29: Links – gewinkeltes Bauteil, rechts – abgewickelte Darstellung; die der Wohneinheit zugewandte Fläche bleibt unverändert.

Durch die abgewickelte Darstellung mit konstantem Querschnitt können Fenster und Türen nicht in die Bauteilaufbauten integriert werden. Diese Flächen müssen jedoch berücksichtigt werden, da sie für den Wärmefluss von großer Bedeutung sind. Daher werden alle Fenster und Türflächen als eine zusätzliche abgewickelte Fläche mit gemitteltem U-Wert modelliert.

In der folgenden Tabelle sind die Abmaße der Bauteile, wie sie sich aus der Plandarstellung der Wohneinheit ergeben, angeführt.

Tabelle 3: Maßangaben zur Wohneinheit und zum abgewickelten Modell

| | |
|--|--------|
| Fläche der Wohneinheit in m ² | 74,07 |
| Volumen der Wohneinheit in m ³ | 185,18 |
| Raumhöhe in m | 2,5 |
| Wand Straßenseite in m | 8,08 |
| Wand Hofseite in m | 4,83 |
| Feuermauer in m | 9,33 |
| tragende Innenwand in m | 16,55 |
| Fensterfläche in m ² | 15,24 |
| abgewickeltes Modell – Tiefe in m | 39,08 |
| abgewickeltes Modell – Breite in m | 1,90 |
| abgewickeltes Modell – Raumhöhe in m | 2,50 |
| abgewickeltes Modell – Fläche in m ² | 74,07 |
| abgewickeltes Modell – Volumen in m ³ | 185,18 |

Nichttragende Innenwände und Wände zur benachbarten gleichartigen Wohneinheit werden vernachlässigt. Die Überlegung dahinter ist, dass diese Wände nur Kontakt zu Zonen mit gleichem oder sehr ähnlichem Raumklima haben. Sie sind überdies nicht mit dem Erdreich in Kontakt und transportieren daher keine aufsteigende Feuchte. Ein kleiner Fehler entsteht dabei dadurch, dass die hygrothermische Pufferwirkung dieser Wände nicht berücksichtigt wird. Dieser Fehler wird in der Simulation vernachlässigt.

In Abbildung 30 sind Querschnitte des abgewickelten Modells dargestellt. Die abgewickelte Betrachtung mit konstant angenommenem Querschnitt auf der gesamten Länge des Bauteils erlaubt eine zweidimensionale Betrachtung der Problemstellung. Die horizontale Interaktion der Bauteile wird vernachlässigt. Beispielsweise ist an Bauteilanschlüssen zwischen Feuermauer und straßenseitiger Wand eine Befeuchtung der Feuermauer über die straßenseitige Wand zu erwarten, da die straßenseitige Wand eine größere erdberührte Fläche aufweist, was einen höheren Feuchtegehalt vermuten lässt.

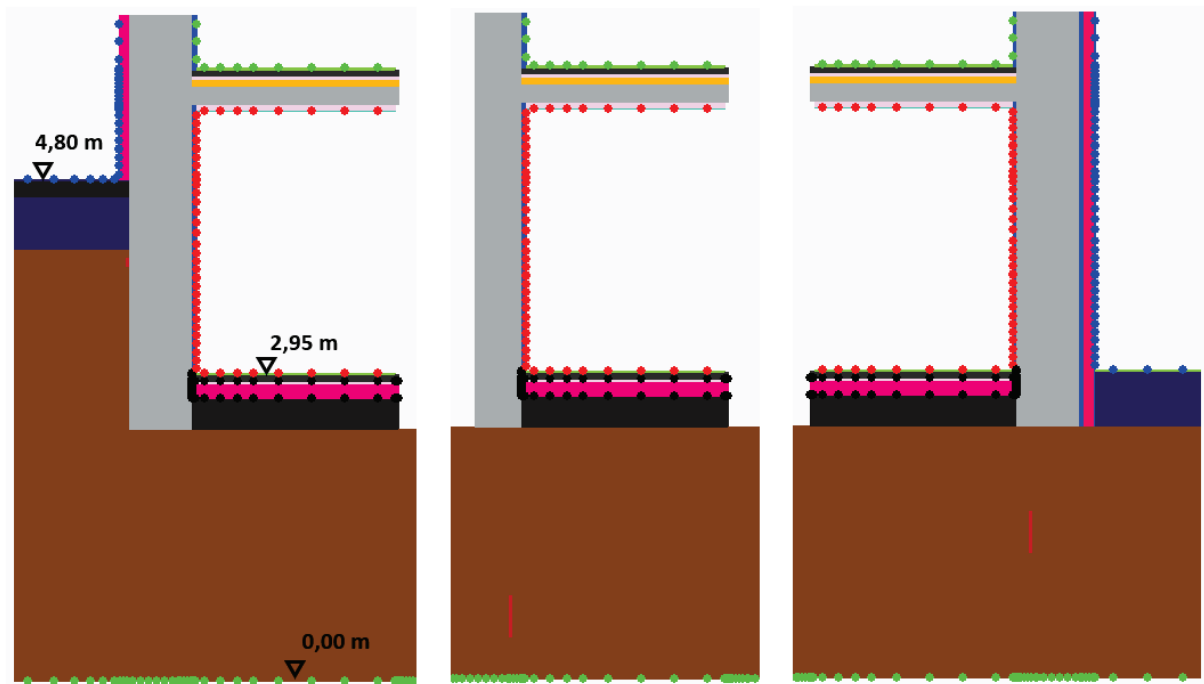


Abbildung 30: Querschnitte des abgewickelten Modells in der Simulationsumgebung; links – straßenseitige Wand mit erhöhtem Gehsteigniveau, Mitte – tragende Innenwand; rechts: hofseitige Wand

Die Seitenlängen der Zellen variieren zwischen 1–20 cm – je nachdem, wie groß der Gradient der Temperatur bzw. des Feuchtegehalts anzunehmen ist. So sind Zellen, die den Luftraum der Zone berühren, dünn, Zellen des Erdreichs, bei denen es vor allem um die passenden Speichermassen und hygrothermischen Widerstände geht, haben größere Abmessungen. Insgesamt hat das Modell rund 10 000 Zellen.

Der Luftraum der Zone wird als ein Luftvolumen mit räumlich konstanten Parametern angenommen. Das heißt, es wird weder zwischen bodennaher und deckennaher Luft unterschieden noch zwischen Luft im Wohnzimmer und Luft in den Schlafzimmern.

Eine weitere Vereinfachung besteht in der Vernachlässigung von verfliesten Flächen. Diese wurden als unverfliest angenommen. Die Überlegung dahinter ist, dass es sich bei Fliesen um einen zusätzlichen Widerstand handelt, der vor allem hygrisch wirkt. Die Vernachlässigung hat eine verstärkte Wechselwirkung zwischen Bauteil und Zone zur Folge. Es ergibt sich ein erhöhter Feuchteeintrag. Die Vereinfachung bewirkt daher eine Verschlechterung der thermischen Behaglichkeit der Zone im Fall von hohen Feuchtwerten, die zu erwarten sind.

4.6.3. Schimmel- und Verrottungsmodell nach Viitanen

Grundlagen

Die ausreichend sichere Vermeidung von Schimmel ist neben der Energieeffizienz eines der zentralen Ziele des Projekts. In diesem Abschnitt werden Informationen für die Beurteilung von Schimmel in Kellerwohnungen bereitgestellt und insbesondere das verwendete Beurteilungsmodell beschrieben. Das maßgebliche Werk, in dem der praktisch relevante Stand des Wissens für die Beurteilung eines Schimmelpilzbefalls zusammengefasst ist, ist in Österreich der „Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelpilzbefall in Gebäuden“ [SCH 19]. Darin dargestellt sind vor allem

1. entsprechende mikrobiologische Grundlagen (inkl. Aktinobakterien),
2. mögliche gesundheitliche Auswirkungen,
3. maßgebliche Normen, vor allem für Probenahme und Analyse sowie Grenzen der Aussagekraft messtechnischer Untersuchungen,
4. rechtliche Rahmenbedingungen, bezogen auf Österreich, unterteilt in Miet- und Eigentumswohnungen,
5. Sanierungsmethoden.

Wohnnutzung des Kellers

Das Umwandeln eines Kellers mit herkömmlicher Nutzung in Wohnnutzung bedingt, dass der Keller nunmehr in die Nutzungsklasse II gemäß Leitfaden [SCH 19] fällt:

„Regelmäßig oder nicht nur vorübergehend genutzte Räume mit dazugehörigen Nebenräumen bilden die Nutzungsklasse II. Hier gelten grundsätzlich alle beschriebenen Anforderungen im Leitfaden. Nebenräume innerhalb der Wohnung oder des Büros sind z.B. Speisekammern, begehbare Schränke oder Abstellräume aller Art. Auch ausgebaute Dachgeschoßräume, die von der Wohnebene aus direkt z.B. über eine Treppe erreichbar sind, werden als Nebenräume innerhalb der Wohnraumebene eingestuft. Bei solchen Räumen gelten die gleichen hohen Anforderungen wie in der übrigen Wohnung, weil nicht ausgeschlossen werden kann, dass Schimmelbestandteile aus diesen Nebenräumen in die anderen Räume der Wohnung gelangen können.“

Voraussetzungen für das Schimmelpilzwachstum

Alle einschlägigen modernen Schimmelpilzmodelle der Bauphysik verwenden die **Feuchte** als maßgeblichen Parameter. Sie ist der wichtigste Einfluss auf Schimmel- und Bakterienwachstum. Fast immer geht sie als *relative Luftfeuchte* in die jeweiligen Modelle ein. Bezüglich theoretischer Grundlagen wird in der Literatur zunächst nicht die relative Luftfeuchte, sondern die sogenannte „Wasseraktivität“ als Maß für frei verfügbares Wasser angeführt. Im Gleichgewichtszustand sind Wasseraktivität und relative Luftfeuchte numerisch gleich: Die Wasseraktivität ist dann der Wasserdampfpartialdruck in der Luft im Material, bezogen auf den Sättigungswasserdampfdruck über einer ebenen Oberfläche (destillierten) Wassers. Bei hydrophilen Materialien – der Mehrheit der Baumaterialien – ist der Sättigungswasserdampfdruck über einer ebenen Wasseroberfläche höher als in der Porenluft einer teilwassergefüllten Kapillare (mit daher konkav gekrümmter Wasseroberfläche = Meniskus). Die bahnbrechende Erkenntnis der Lebensmittelkunde, veröffentlicht in [SCO 57], war, dass nicht, wie bis dahin angenommen, der Wassergehalt eines Stoffes in kg/kg oder kg/m³, sondern die Wasseraktivität (= relative Luftfeuchte in allen praktischen Fällen) für das Schimmelrisiko entscheidend ist.

Die **Temperatur** beeinflusst

1. die relative Luftfeuchte als entscheidenden Wachstumsfaktor für Schimmelpilze. Raumseitig rasche Schwankungen der relativen Luftfeuchte sind oft durch Temperaturschwankungen bedingt.
2. als separater Wachstumsfaktor die Entwicklung des Schimmelpilzes.

Entscheidend ist nicht die mittlere Raumlufttemperatur, sondern die Oberflächentemperatur der raumumschließenden Bauteile, denn vorwiegend an diesen oder in der Nähe dieser Oberflächen (z.B. an wand- oder bodenzugewandten Möbelseiten) findet das Auskeimen und das Wachstum statt.

Nährstoffe sind in praktisch allen Fällen durch die Deposition des ubiquitären Hausstaubs mit seinen organischen Anteilen ausreichend vorhanden. Diese Voraussetzung stellt de facto nie eine Beschränkung für das Schimmelwachstum dar.

Der **pH-Wert** hat einen Einfluss, da Pilze sich in deutlich alkalischen Milieu nicht gut entwickeln können (vgl. das vor allem in ländlicher Gegend früher ausgeübte regelmäßige „Kalken“ der Innenräume), aber ein hoher pH-Wert ist aufgrund der bauchemischen Vorgänge nach Einbringung der Baustoffe wie Kalk oder Zement nicht von Dauer. Außerdem ist für die Anfangsentwicklung eines Pilzes nicht der pH-Wert der Bauteiloberfläche maßgeblich, sondern der Wert des auf der jeweiligen Oberfläche angelagerten organischen Substrats, das planerisch jedoch nicht nennenswert beeinflussbar ist.

Die gesundheitliche Relevanz von Schimmel

Ob Schimmel im Einzelfall tatsächlich eine gesundheitliche Beeinträchtigung hervorruft, kann, abgesehen von der Herausforderung der messtechnischen Erfassung der Zusatzbelastung im Innenraum im Vergleich zur Grundbelastung der Außenluft, häufig nicht eindeutig festgestellt werden, vor allem dann nicht, wenn nicht offenkundig massive Schimmelbelastungen feststellbar sind. Ungeachtet dessen ist unabhängig vom jeweiligen Einzelfall Schimmel immer als *Gesundheitsrisiko* zu betrachten, der „Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden“ [SCH 19] sagt dazu:

„Schimmelwachstum im Innenraum ist als Gesundheitsrisiko zu betrachten, auch ohne dass ein quantitativer und kausaler Zusammenhang zwischen dem Vorkommen einzelner Schimmelpilzarten oder bestimmter biogener Schadstoffe und Gesundheitsbeschwerden gesichert hergestellt werden kann.“

So heißt es auch in der entsprechenden WHO-Richtlinie, die im erwähnten Schimmelleitfaden zitiert wird [WHO 09]:

„Sufficient epidemiological evidence is available from studies conducted in different countries and under different climatic conditions to show that the occupants of damp or mouldy buildings, both houses and public buildings, are at increased risk of respiratory symptoms, respiratory infections and exacerbation of asthma. Some evidence suggests increased risks of allergic rhinitis and asthma. Although few intervention studies were available, their results show that remediation of dampness can reduce adverse health outcomes.“

Das Thema ist in [SCH 19], S. 165 (reflektierter Gesetzesstand 2017) behandelt, wobei in eigenen Abschnitten die Fälle

1. „Mietobjekt“ mit detaillierten Ausführungen zum Mietrechtsgesetz und
2. „Eigentumsobjekt“

behandelt werden. Im Folgenden ist ein einschlägiges Zitat zu Mietobjekten angeführt: Gemäß [SCH 19], S. 168 darf

„... der Mieter in dem bedungenen Gebrauch nicht gestört werden, wobei defaultmäßig eine ‚mittlere Brauchbarkeit‘ als vereinbart gilt, das ist die Möglichkeit, das Bestandobjekt so zu

verwenden, wie es nach einem gewöhnlichen Mietvertrag, unter Bedachtnahme auf den Vertragszweck, und der Verkehrssitte vorausgesetzt werden kann. Da Schimmelbefall bei einem entsprechenden Umfang auch gesundheitsgefährdend für den Mieter ist, ist in der Regel davon auszugehen, dass bei relevantem Schimmelbefall die Brauchbarkeit nicht mehr gegeben ist. Kleinflächiger Schimmelbefall ist gemäß einer OGH-Entscheidung nicht als ernster Schaden zu werten.“ (OGH 12.06.1996, 5Ob2060/96v)

Schimmelpilzmodelle

Einen guten Überblick über gängige Schimmelpilzmodelle für die bauphysikalische Anwendung findet man in [VER 12] sowie in [BPH 17]. In den beiden für die Planungspraxis relevanten kommerziellen Softwares, die Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen simulieren, WUFI und Delphin, werden nur diese zwei Modelle eingesetzt, das VTT-Modell und das biohygrothermische Modell, alle anderen Modelle werden ausschließlich in wissenschaftlichen Arbeiten verwendet.

Für die modellhafte Beschreibung der Schimmelpilzentwicklung werden vor allem folgende beiden Phasen unterschieden

1. Das *Auskeimen der Sporen*: Die bekannteste Darstellung für den Zusammenhang zwischen minimaler relativer Luftfeuchte und Temperatur, die für das Auskeimen von Sporen erforderlich sind, stammt von Viitanen.

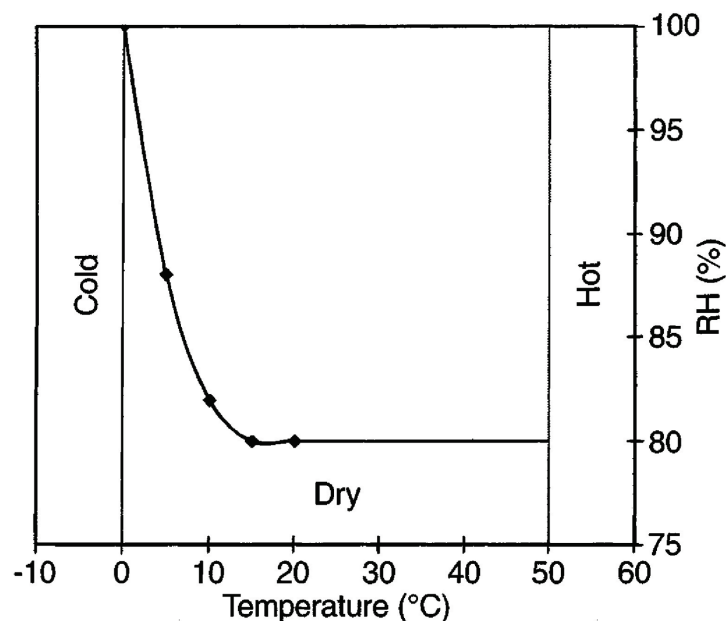


Abbildung 31: Verlauf der für das Auskeimen von Sporen (= Schimmel-Wachstumsbeginn) kritische Feuchte über der Temperatur. Quelle: [HUK 99]

2. Das *Weiterwachsen des Schimmels* über die Bildung von Hyphen (eine Basisstruktur der Pilze, die nicht mit dem freien Auge sichtbar ist) bzw. dem Myzel, der bei Schimmelpilzen meist watteartigen Verflechtung von Hyphen: Sobald Myzele ausreichend dick sind, sind sie mit freiem Auge zu erkennen.

Eine dritte Phase, die *Bildung neuer Sporen* („Sporulation“) wird zwar ebenfalls als eigene Phase unterschieden, ist aber über längere Zeiträume nicht wachstumsrelevant, da Sporen in fast allen Praxisfällen ohnehin aus der Umgebungsluft verfügbar sind und daher eine eingeschränkte Möglichkeit zur Sporeneubildung keine grundsätzliche Wachstumsbeschränkung für den Schimmelpilz darstellt.

Das **VTT-Modell** ist aktuell eines der wichtigsten Schimmelpilzmodelle und ist

1. in HAM4D_VIE, der im aktuellen Projekt verwendeten Software (Validierung beschrieben in [SAR 19]),
2. in einer EXCEL-Datei (TU Wien intern) und
3. in den HAM-Simulationsprogrammen WUFI (über einen Umrechnungsansatz zwischen dem „biohygrothermischen“ Modell und dem VTT-Modell) und Delphin ([RIB 20])

implementiert.

Das VTT-Modell kennzeichnet das Entwicklungsstadium und das Ausmaß des Schimmelbefalls einer Oberfläche durch eine einzige Kennzahl, den „**Mould Index**“ (MI). Der Mould Index ist im Wesentlichen ein Maß für den Anteil an einer Oberfläche, der mit einem Myzelgeflecht bedeckt ist. Der Index wird für diesen Zweck als ganze Zahl auf einer siebenstufigen Skala 0-6 angegeben, wobei ab Stufe 3 der Schimmelbefall klar mit freiem Auge und davor nur mit einem optischen Mikroskop erkennbar ist. Ab Stufe 1 keimen die Sporen aus, und das Schimmelwachstum beginnt, ab Stufe 3 werden neue Sporen (Sporulation) gebildet. Das VTT-Modell trifft mit den 7 Stufen (inkl. Stufe 0) die feinste Unterteilung gängiger Schimmelpilzmodelle [VER 12].

Das Rechenmodell des Mould Index entstand ab Ende der 1980er-Jahre in Finnland über die Beobachtung des Schimmelbefalls von mit Sporenwasser besprühten Kiefern- und Fichtenproben. Die zentrale Beschreibung des Modellansatzes ist in [HUK 99] enthalten, die Eckpunkte werden im Folgenden wiedergegeben.

1. In der Modellbildung und damit für die Simulation wird angenommen, dass der Mould Index eine Größe ist, die *kontinuierliche* Werte annehmen kann. Über Beobachtung klassifiziert, also per Mikroskop oder mit freiem Auge, wird der Mould Index üblicherweise aber nur als *diskrete* Größe gemäß den definierten 7 Entwicklungsstufen bestimmt. Eine Validierung der Simulation über Beobachtung erfolgt damit an diesen Stützstellen. Als kontinuierliche Größe validiert werden hingegen kann die Dauer bis zum Auskeimen der Sporen.
2. Der Modellbildung liegt ein *Regressionsmodell* zugrunde, das sich auf beobachtete Mould Index Entwicklungen stützt („Trainingsdaten“), Beobachtungen, die in den 1980er- und 1990er-Jahren gemacht wurden. Die entscheidende Beobachtungsgröße war die *Zeit*, die erforderlich ist, um von einer Mould Index Stufe aus die jeweils nächste zu erreichen.
3. Als Voraussetzung für das Auskeimen der Sporen – das entspricht dem Beginn des Schimmelwachstums – wird eine minimale relative Luftfeuchte (kritische Luftfeuchte) angenommen, die für die jeweilige Temperatur (in den ersten Versuchen wurden konstante Versuchsbedingungen gewählt) gilt. Die kritische Luftfeuchte wird mit RH_{crit} bezeichnet. Die Temperaturabhängigkeit der für den Wachstumsbeginn erforderlichen kritischen Luftfeuchte gemäß entwickeltem Formelsystem der Regressionsanalyse ist in einem in der einschlägigen Literatur verbreiteten Diagramm dargestellt (Abbildung 31). Ein Auskeimen ist zwischen 0 °C und 50 °C und bei über 80% relativer Luftfeuchte möglich, wobei ab 12 °C mit fallender Temperatur eine immer höhere relative Luftfeuchte erforderlich ist.
4. Bei Vorliegen von RH_{crit} kann aber ein bestimmter *maximaler Mould Index* M_{max} dennoch nie überschritten werden. Auch nach sehr langen Expositionszeiten wird somit ein gewisser durch Feuchte und Temperatur begrenzter Grad an Flächendeckung durch Schimmel nie überschritten.

5. Der Verlauf des maximal erreichbaren Mould Index M_{\max} ist eine von 0 °C nach 20 °C abfallende Parabel. Im Extremfall 100 % relativer Luftfeuchte wird unabhängig von der Temperatur immer der maximale Befall (Mould Index 6) erreicht, das entspricht im Diagramm einer Horizontalen.
6. Als Modellausgangsbasis, die in einer Verfeinerung modifiziert wird, wird – bei konstanten Bedingungen – eine mit der Zeit *linear* ansteigende Entwicklung des Mould Index angenommen. Unterschieden wird aufgrund der Beobachtung dabei
 - die Wachstumsgeschwindigkeit des Mould Index bis zum ersten *Auskeimen* der Sporen (Auskeimen ab Mould Index = 1), wobei der lineare Verlauf unterhalb des Mould Index = 1 willkürlich angenommen wurde, da nur sein Ende aber nicht der Verlauf selbst beobachtet werden kann.
 - die Wachstumsgeschwindigkeit der daran anschließenden Zeitspanne des *Wachstums bis zum Erreichen des Mould Index = 3*, bis man also den Schimmel mit freiem Auge erkennen kann.
7. Da bei konstanten Umgebungsbedingungen gemäß Beobachtung ein entsprechender maximaler Mould Index nie überschritten wird, muss sich das simulierte Schimmelpilzwachstum bei Annähern an den maximal erreichbaren Wert entsprechend verlangsamen. Das wird durch einen Abminderungsfaktor erreicht, implementiert als Exponentialfunktion, die mit der Differenz zwischen aktuellem Mould Index und maximalem Mould Index gegen null strebt.
8. In weiteren Arbeiten wurde das Schimmelverhalten auch bei Einsetzen *ungünstiger Wachstumsbedingungen*, also unter dynamischen Umgebungsbedingungen untersucht. „Ungünstig“ bedeutet dabei in erster Linie *trocken* und in zweiter Linie *kühl*. Trockenere Bedingungen führen dazu, dass das Wachstum zunächst zum Stillstand kommt und später, bei Wiederherstellen der originalen günstigen Bedingungen, das Wachstum nicht mit gleicher Geschwindigkeit wie zuvor voranschreitet, sondern erst *verzögert* wieder einsetzt – so als brauchte der Pilz zunächst eine „Erholungsphase“, während der er das während der ungünstigen Trockenphase versäumte Wachstum wettmacht.
9. Bei der Wachstumsverzögerung, die durch trockenere Bedingungen entsteht, ist kein Einfluss der Dauer der ungünstigen Periode auf das Ausmaß der Verzögerungswirkung erkennbar, solange diese Dauer zwischen 6h und 24 h liegt. Bei ungünstigen Phasen, deren Dauer über 24 h hinausgeht, war die danach beobachtete Wachstumsverzögerung bereits ausgeprägter.

Wie ist ein Rückgang des Mould Index in der Simulation zu interpretieren?

Durch die Modellierung des Schimmelbefalls über einen Mould Index gerät leicht in den Hintergrund, was in den dem Modell zugrunde liegenden Versuchen eigentlich beobachtet wurde: Die gesamte Modellbildung bezieht sich ausschließlich auf Beobachtungen des zeitlichen Verlaufs eines Schimmelbefallwachstums. Ein Rückgang an Schimmelbefall wurde im Zeitverlauf nie beobachtet. Dies entspricht der Alltagserfahrung, dass einmal aufgetretener Schimmel auch bei ungünstigen Bedingungen nicht mehr verschwindet. Ein Rückgang des dem Modell zugrunde liegenden Mould Index darf also nicht als Prognose eines Rückgangs real beobachteten Schimmelbefalls interpretiert werden. Laut [HUK 99] ist der Mould Index als die auf der Substratoberfläche mögliche Pilzaktivität („...possible activity of the mould fungi on the wood surface.“) zu interpretieren:

The model is purely mathematical in nature and as mould growth is only investigated by visual inspection, so it does not have any connection to biology in the form of modelling the number of live cells. Also, the mould index resulting from computation with the model does not reflect the visual appearance of the surface under study, because traces of mould growth remain on wood surfaces for a long time. The correct way to interpret the results is that the mould index represents the possible activity of the mould fungi on the wood surface.

Ein Rückgang des Mould Index ist lediglich der mathematische Ansatz, um die wachstumsverzögernde Wirkung ungünstiger Umgebungsbedingungen („Trockenphase“) auf eine an die Trockenphase anschließende Wachstumsphase abzubilden, die erfolgt, sobald die günstigen Bedingungen vor der Trockenphase wieder hergestellt werden. Der Pilz benötigt also nach einer Phase ungünstiger Bedingungen eine Erholungs- bzw. Wiederanlaufphase, um nach Rückkehr zu den zuvor herrschenden günstigen Bedingungen wieder mit der ursprünglichen Geschwindigkeit weiterzuwachsen. Dieser Umstand kann mit einem *Schleppzeigerthermometer* verglichen werden, wobei in dieser Analogie die aktuell angezeigte Temperatur dem Mould Index und die bislang maximal aufgetretene Temperatur dem sichtbaren Schimmelbefall entspricht. Auch eine Interpretation dahingehend, dass der Mould Index ein Maß für den jeweils noch lebenden Teil des Pilzes darstelle, entbehrt jeglicher Grundlage (aus dem obigen Zitat: „... so it does not have any connection to biology in the form of modelling the number of live cells“). In der der Modellbildung zugrunde liegenden beschriebenen Beobachtung wurde nicht unterschieden, welcher Teil des Pilzes lebt oder bereits abgestorben ist.

Große Unsicherheiten von Schimmelpilzmodellen

Die komplexe Entwicklung eines Organismus in Formeln zu gießen, die nur von wenigen Variablen abhängen, ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Schimmelpilzmodelle wurden bislang nur unter Laborbedingungen validiert. Dies geschah, was die Nährstoffversorgung betrifft, meist für den Worst Case, um auf der sicheren Seite zu liegen. Konkret bedeutet das, dass z. B. auf sogenannten „Vollmedien“, also einem Substrat, das alle Nähr- und Begleitstoffe beinhaltet, die der jeweilige Pilz für ein optimales Wachstum benötigt, untersucht wurde, bzw., wie im Falle von Viitanen & Co., eine Nährstofflösung auf das Holz gespritzt wurde. Überdies wurden Proben nur in wenigen Fällen dynamischen Umgebungsbedingungen unterworfen, also konkret Änderungen von relativer Luftfeuchte und Temperatur, wie es in der realen Nutzung der Fall ist. Und auch bei dynamischen Umgebungsbedingungen sind die jeweiligen Zyklen eher nicht kürzer als 12h gewählt, da andernfalls die durch die Messung verursachte Unterbrechung der Einwirkung der Randbedingungen nicht mehr vernachlässigbar wäre. Auch bestehen unterschiedliche Definitionen bei der Beurteilung

1. des *Einsetzens des Schimmelpilzwachstums*, so vor allem, wann eine Spore als ausgekeimt gilt. Je nach Definition prognostizieren die Modelle bei gleichen Versuchsbedingungen das Eintreten des Schimmelwachstums für unterschiedliche Zeitpunkte.
2. des *Schimmelwachstums an sich* (Hyphenwachstum in mm/Tag, Bedeckungsgrad einer Fläche, Erreichen einer kritischen Luftfeuchte) mit überdies unterschiedlichen Skalen.

4.6.4. Ermittlung von Feuchteemissionsprofilen

Um einen dynamischen Verlauf der inneren Lasten zu erhalten, wurden einzelne Vorgänge (Kochen, Duschen etc.) in einer Tabellenkalkulation über den Verlauf eines Jahres angeordnet. Es wurden verschiedene Nutzertypen definiert: Kleinkind, Schüler:in, Jugendliche Person, Student:in, Arbeitslose Person, Teilzeitbeschäftigte Person, Vollzeitbeschäftigte Person, Pensionist:in. Diese Nutzer:innen

unterscheiden sich in Bezug auf ihren Tagesablauf und den damit verbundenen Anwesenheitszeiten und verursachen hygrometrischen Lasten. Da die Beispielwohnung in der Realität als Wohngemeinschaft genutzt wird, wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Messungen für die Simulationen ebenfalls eine Wohngemeinschaft aus drei Student:innen angenommen.

Die inneren Feuchtelasten wurden basierend auf dem DIN-Fachbericht 4108-8 erstellt. Die Wärmelasten wurden aus Recknagel [REC 05] entnommen. Die folgende Tabelle 4 zeigt die angenommenen Werte.

Tabelle 4: Berücksichtigte innere Lasten

| Feuchtelasten in kg | |
|---------------------|------|
| Personenstunde | 0,05 |
| Dusche | 0,3 |
| Vollbad | 0,3 |
| Kochen | 0,85 |
| Geschirrspüler | 0,1 |
| Wäschetrocknen | 2,5 |
| Wärmelasten in Wh | |
| Personenstunde | 123 |
| Kochen | 1450 |

Bei der Wäschetrocknung wurde angenommen, dass sie über einen Zeitraum von 48 Stunden stattfindet. Für das Kochen wurde angenommen, dass die Wohneinheit mit einem Kochvorgang zur Mittagszeit und einem halben Kochvorgang morgens belastet wird. Insgesamt kommt der Haushalt dabei auf eine mittlere Feuchtelast von 6,2 kg/d. Dies ist ein plausibler Wert nach DIN-Fachbericht 4108-8, der für einen Drei-Personen-Haushalt eine Feuchtelast von 5,6-7,5 kg/d vorschlägt. Die jeweilige Feuchtemenge infolge der Nutzung wird in jedem Zeitschritt der Simulation dem Innenraum bzw. der Modellzone zugeführt.

Neben den nutzungsbedingten Feuchteemissionen spielen in einer Souterrainwohnung eines Gründerzeithauses auch die Emissionen aus den Bauteilen eine wesentliche Rolle. Das Raumklima der Souterrainwohnung wird als Unbekannte im Simulationsmodell angeführt und infolge aller anderen Randbedingungen berechnet. Die Feuchteemissionen aus den Bauteilen werden nicht fix angenommen, sondern basierend auf der angenommenen Feuchtigkeit des Bodens in der hygrometrischen Simulation mitberechnet. Somit entsteht eine Kette von Abhängigkeiten, von der Bodenrandbedingung über den Feuchtetransport in den Materialien bis hin zur Feuchteabgabe an die Raumluft, die durch das Simulationsprogramm abgebildet wird. Diese Vorgangsweise ist mit einem Fehler behaftet, der im Zuge des Projekts nicht eindeutig bezifferbar war. Zur Abschätzung des Fehlers wurden Vergleichsmessungen an einem realen Objekt durchgeführt, wobei die Feuchteemissionen aus den Wänden durch eine Messung der Anfeuchtung aus den umgebenden Wänden und anschließender Entfeuchtung der Raumluft mit einem Luftentfeuchter berechnet wurden. Die Zyklen der Anfeuchtung und der Entfeuchtung wurden über einen Monat täglich wiederholt, um einen quasistationären Zustand zu erreichen. Die Auswertungen der Messungen und die Interpretation der Ergebnisse sind in Abschnitt 5.4 angeführt.

4.6.5. Randbedingungen

Um in der instationären hygrothermischen Simulation Temperatur- und Feuchtezustände im Zeitverlauf berechnen zu können, werden für jeden Zeitschritt der Simulation entsprechende Randbedingungen benötigt. Diese werden durch das Außenklima an der Straßen- und an der Hoffassade, durch das Raumklima der Erdgeschoßwohnung sowie durch die Bodenrandbedingung bestimmt. Vernachlässigt werden hingegen Einflüsse von horizontalen Nachbarwohnungen. Für diese wird die gleiche Nutzungsart angenommen wie für die simulierte Zone der Souterrainwohnung. Daher sind an den Wohnungstrennwänden keine nennenswerten Wärme- und Feuchteflüsse zu erwarten. Darüber hinaus werden horizontale Wärme- und Feuchteflüsse im Erdreich über die Bilanzgrenze hinweg vernachlässigt. Im Simulationsmodell wird ein Erdkörper mitgerechnet, der sowohl dem Außenklima als auch der Bodenrandbedingung ausgesetzt ist. Die Positionen der Randbedingungen sind in den Modelldarstellungen in Abbildung 30 ersichtlich.

Halbsynthetisches Außenklima

Die Außenklimarandbedingung wird als halbsynthetischer Klimadatensatz des Jahres 2019 aus verschiedenen Messstellen zusammengestellt. Dazu wurden die realen Messdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit an den Standorten Neilreichgasse 3-5 und Erlgasse 38 zu einem gemischten Klimadatensatz vereint, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Temperatur- und Feuchteextreme auftreten. Die Messdaten stammen von den Wetterstationen der Parteienkellerlüftungen sowie von den Außensensoren der Bauteilmonitorings, die an den jeweiligen Standorten im Innenhof montiert sind. Es ist somit davon auszugehen, dass sowohl die Temperatur- als auch die Feuchtemessdaten in puncto Tagesamplituden und Extremwerten einem realistischen Außenklima an einer Innenhofwand entsprechen. Die folgende Abbildung 32 zeigt die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der halbsynthetischen Außenklimarandbedingung.

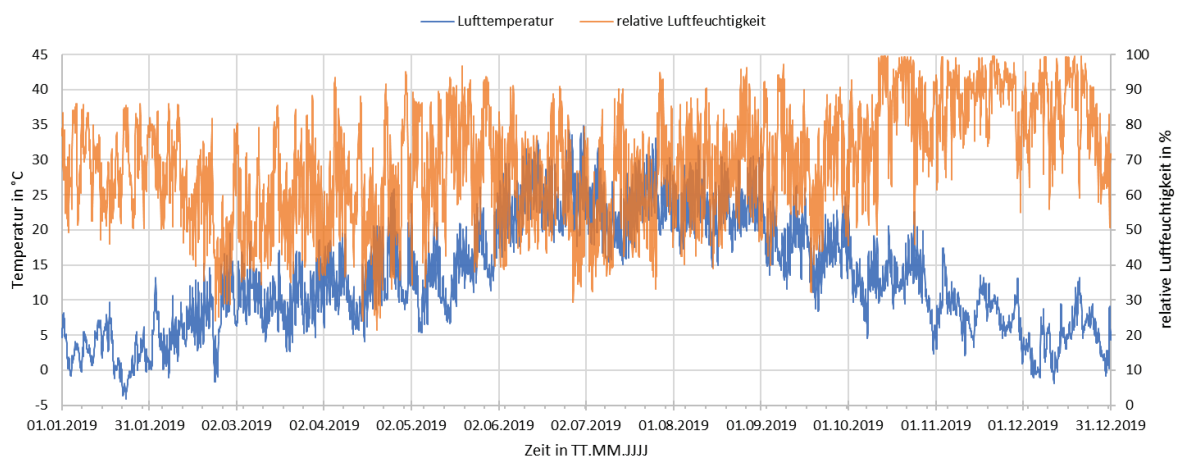


Abbildung 32: Temperatur- und Feuchteverlauf der halbsynthetischen Außenklimarandbedingung bestehend aus realen Messdaten der Standorte Neilreichgasse und Erlgasse

Die Klimarandbedingung des Simulationsprogramms beinhaltet neben der gemessenen Lufttemperatur und der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit noch weitere Parameter. Diese sind der konvektive Wärmeübergangswiderstand, die Strahlungstemperatur sämtlicher umgebender Objekte, der Emissionsgrad sowie der Absorptionsgrad der Bezugsfläche sowie die solare Einstrahlung auf die

Bezugsfläche. Die folgende Tabelle 5 zeigt die ersten Zeilen des generierten Klimadatensatzes für die Eingabe in das Simulationsprogramm HAM4D_VIE.

Tabelle 5: Header und erste Datensätze der Klimarandbedingung für die Eingabe in das Simulationsprogramm HAM4D_VIE

| halbsynthetisches Klima Neireichgasse_HAM4D_VIE | | | zeit(PeriodenEnde)_temp_alphaC_tempS_eps_rad_absG_phi_betaV_suc_qL_druck | | | | | | | | | | |
|---|------|------------------------------------|--|--|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|
| Datum | 2019 | T_L Index Temperatur Luft °C | hc Konvektiver Wärme- übergangskoeffizient W/m²K | T_S Strahlungs- temperatur °C | eps Emissions- grad | rad Strahl- ung W/m² | absG Absorptions- grad | phi rel. Luftfeuchte | betaV Feuchteübergangs- koeffizient kg/m³s | suc Saug- spannung Pa | qL flüssiges Wasser l/m² | druck Luft- druck Pa | |
| 01.01.2019 00:00 | 1 | 4,97 | 4,97 | 8,611 | -0,03 | 0,9 | 0 | 0,5 | 76,96 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 01:00 | 2 | 4,72 | 4,72 | 7,333 | -0,28 | 0,9 | 0 | 0,5 | 77,86 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 02:00 | 3 | 4,98 | 4,98 | 8,120 | -0,02 | 0,9 | 0 | 0,5 | 78,18 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 03:00 | 4 | 5,40 | 5,40 | 8,074 | 0,40 | 0,9 | 0 | 0,5 | 78,07 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 04:00 | 5 | 5,76 | 5,76 | 8,537 | 0,76 | 0,9 | 0 | 0,5 | 78,91 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 05:00 | 6 | 5,92 | 5,92 | 8,926 | 0,92 | 0,9 | 0 | 0,5 | 77,74 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 06:00 | 7 | 6,08 | 6,08 | 8,444 | 1,08 | 0,9 | 0 | 0,5 | 78,08 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 07:00 | 8 | 6,36 | 6,36 | 10,241 | 1,36 | 0,9 | 0,2208 | 0,5 | 83,46 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |
| 01.01.2019 08:00 | 9 | 6,73 | 6,73 | 10,769 | 1,73 | 0,9 | 3,0375 | 0,5 | 82,31 | 2,50E-08 | 0 | 0 | |

Da an den jeweiligen Standorten keine Strahlungsmessdaten und keine Winddaten zur Verfügung standen, wurden Messdaten des gleichen Zeitraums der Wetterstation des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität für Bodenkultur (BOKU-Met) herangezogen [MET 21]. Die solare Einstrahlung im Innenhof wurde mit 50% der Diffusstrahlung der BOKU-Met angenommen. Der konvektive Wärmeübergangswiderstand wurde aus den Winddaten der BOKU-Met berechnet, wobei nur 50% der Windgeschwindigkeit angesetzt wurden. Die Strahlungstemperatur wurde über das gesamte Jahr mit 5 K unter der Lufttemperatur angenommen. Weiters wurde für die helle Fassade des Kellerbereichs ein Emissionsgrad von 0,9 und ein Absorptionsgrad von 0,5 angesetzt. Aufgrund der Hoflage wurde angenommen, dass kein Schlagregen auf die Fassade auftrifft. Die angeführten Klimadaten sind im Anhang unter 9.2 dokumentiert.

Wohnung über Kellergeschoß

Die hygrothermischen Simulationen beschränken sich auf den Bereich der Souterrain-/Gartenwohnung. Die Nachbarwohnung über der simulierten Zone wird als bewohnt angenommen. Um die Vielfalt an Varianten gering zu halten, werden bestimmte Annahmen getroffen.

Als untere Grenze für die Temperatur der Nachbarwohnung wird die Soll-Innentemperatur der simulierten Variante angenommen, als obere Grenze die Komfortgrenze von 26°C. Dazwischen bewegt sich die Temperatur in einem sinusförmigen Jahresverlauf, der im Sommer die Obergrenze und im Winter die Untergrenze erreicht. Die relative Luftfeuchtigkeit wird konstant mit 50 % angenommen.

Bodenrandbedingung

Die Systemgrenze der hygrothermischen Simulation des Wohnungsmodells liegt 2,4 m unter der Fundamentplatte des Kellers bzw. 4,8 m unter der Oberkante des Gehsteigniveaus (siehe Abbildung 30). Die Bodenrandbedingung wird an dieser Systemgrenze angesetzt und stellt die Verbindung des Simulationsmodells zum umgebenden Erdboden dar. Um an dieser Stelle realistische Werte des Temperaturverlaufs ansetzen zu können und um eine Plausibilitätskontrolle der Speichermassen im Boden durchzuführen, wurden Testsimulationen an einem eindimensionalen Bodenmodell durchgeführt. Das Modell besteht aus einer 1x1 m großen Bodenfläche, die 50 m tief ist (siehe Abbildung 33). Das Modell besteht aus 500 Zellen, somit ist eine Zelle 10 cm dick. An der Oberseite dieses Quaders ist das halbsynthetische Außenklima (wie oben beschrieben) angesetzt. Alle anderen fünf Oberflächen des Modells sind als adiabatisch angenommen. Weiteres wurde die

Anfangsbedingung im Materialblock der Simulation mit 10°C angenommen. Das Bodenmodell wurde rein thermisch simuliert, um die Temperaturschichtung bis in eine Tiefe von 4,8 m abbilden zu können. Es wurde ein Zeitraum von 100 Jahren durchgerechnet, wobei das halbsynthetische Außenklima periodisch wiederholt wurde. Für die Auswertung wurde das hundertste Jahr der Simulation herangezogen.

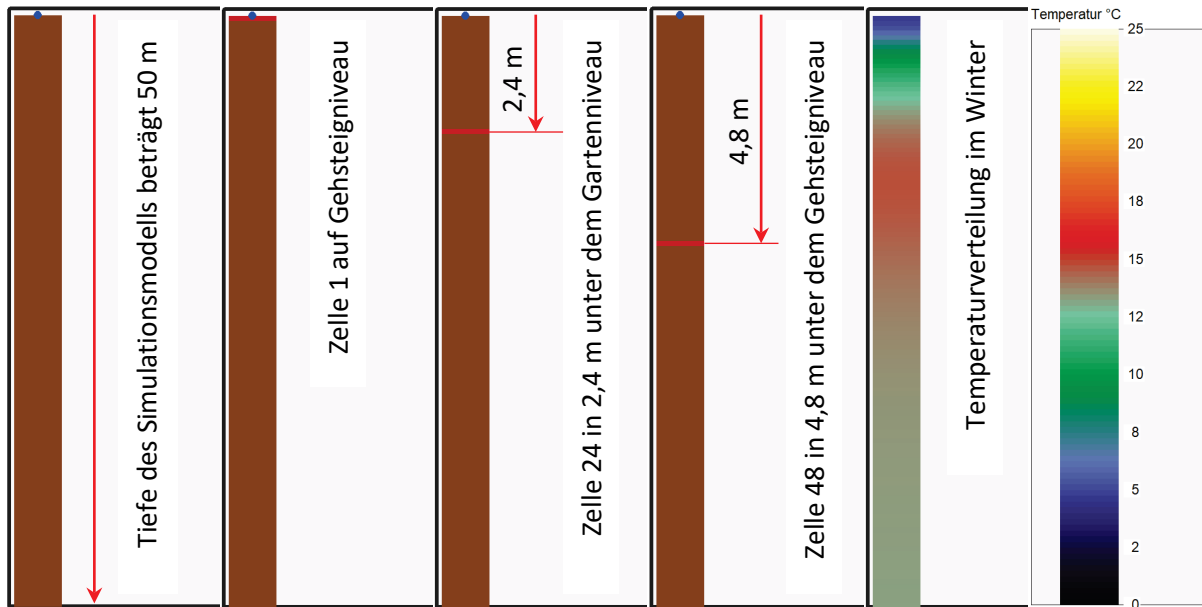


Abbildung 33: Simulationsmodell zur Bestimmung der Bodentemperatur in 4,8 m Tiefe unter dem Gehsteigniveau bzw. in 2,4 m Tiefe unter dem Gartenbereich; die ermittelte Temperaturverteilung wird als Bodenrandbedingung im hygrothermischen Bauteilmodell angesetzt.

Die Simulationsergebnisse des Bodenmodells zeigen, dass in 4,8 m Tiefe eine annähernd konstante Temperatur mit einer minimalen Sinusschwingung von 13,0 bis 14,2 °C über das Jahr verteilt vorherrscht. In der halben Tiefe bei 2,4 m ist ein deutlicher Sinusgang und eine Phasenverschiebung von circa zwei Monaten erkennbar. Die genaue Temperaturschichtung im Boden sowie die damit einhergehende Phasenverschiebung ist in Abbildung 34 dargestellt.

Da das hygrothermische Simulationsmodell der Souterrainwohnung im Hofbereich ein tieferes Außenniveau aufweist als an der Straßenfassade, wurde eine Vereinfachung der Bodenrandbedingung vorgenommen. Es wurde eine einheitliche Randbedingung über die gesamte Gebäudetiefe angenommen, wobei sowohl die Temperaturprofile als auch die Phasenverschiebungen über die beiden Bodentiefen gemittelt wurden.

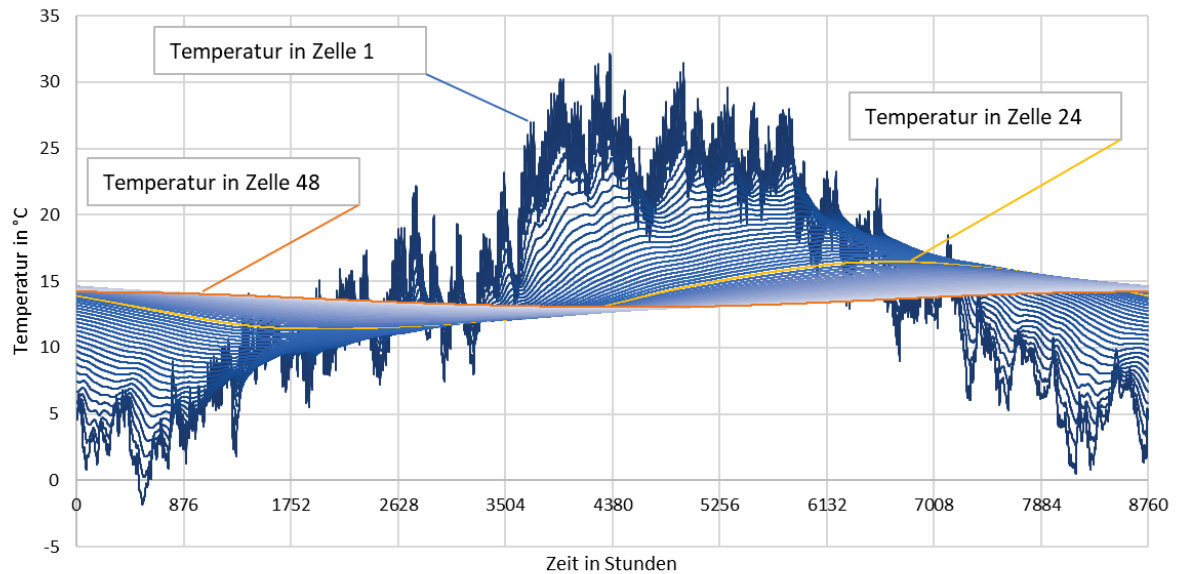


Abbildung 34: Temperaturverlauf über ein Jahr in den einzelnen Bodenschichten zwischen der Bodenoberfläche und 4,8 m Tiefe; der Zeitpunkt 0 entspricht dem 1. Jänner um 0 Uhr des Simulationsjahres

Als Temperaturverlauf für die Bodenrandbedingung im hygrothermischen Simulationsmodell der Souterrainwohnung wurde somit ein sinusförmiger Jahresverlauf angenommen. Die mittlere Temperatur wird mit $11,9^{\circ}\text{C}$ und die Differenz zwischen Maximum und Minimum mit 7 K angenommen.

Um aufsteigende Mauerfeuchte zu simulieren, wurde an der Bodenrandbedingung eine geringe Saugspannung angesetzt. Wenn an einer Materialzelle eine Saugspannung nahe Null anliegt, bedeutet dies, dass die Materialporen gesättigt sind. Die Annahmen im vorliegenden Simulationsmodell entsprechen einem nassen, jedoch nicht gesättigten Lehmboden in der Realität. Sie beruhen auf den Testsimulationen, die im Projekt Sanierungsbauteilkatalog [ZEL 17] am Forschungsbereich Bauphysik der TU Wien durchgeführt wurden. Im Zuge von „space4free“ wurde die bewährte Methodik aus dem Vorprojekt übernommen. Es wurden weitere Testsimulationen an kleinen Modellen durchgeführt, um einerseits den zwischenzeitlich überarbeiteten Algorithmus von HAM4D_VIE zu berücksichtigen und andererseits, um die geänderten Materialparameter in die aktuellen Simulationen mit einfließen zu lassen. Ziel der Variation der Saugspannung an der Bodenrandbedingung war, eine qualitativ plausible aufsteigende Mauerfeuchte zu simulieren und somit einen realistischen Feuchteintrag aus dem Boden in den Bauteilsimulationen berücksichtigen zu können.

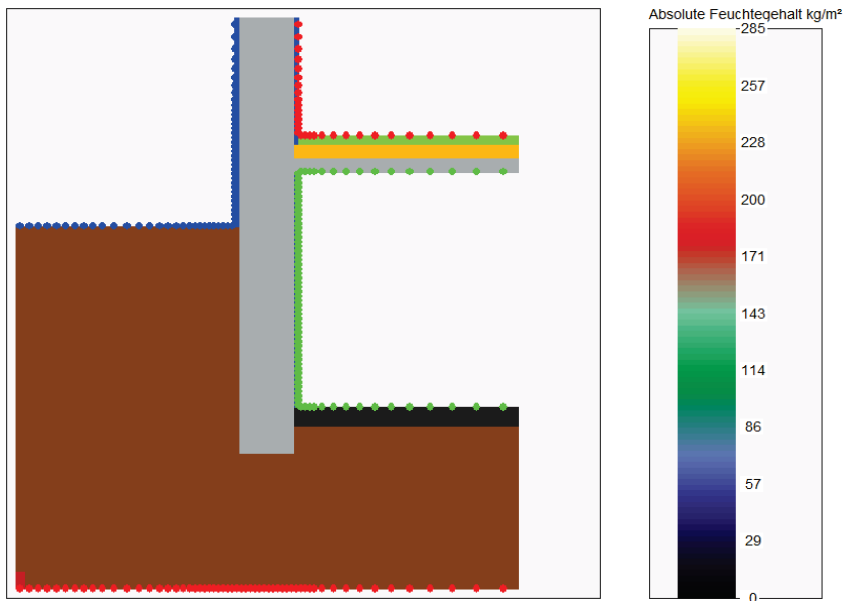


Abbildung 35: Simulationsmodell zur empirischen Bestimmung der Saugspannung an der Bodenrandbedingung (links); Farb- und Zahlenskala des Wassergehalts in kg/m^2 , bezogen auf den Querschnitt des Modells

Es wurde ein dreidimensionales Modell verwendet, das aus einem Querschnitt einer Außenwand mit anliegendem Erdkörper (siehe Abbildung 35) besteht. Der Querschnitt wurde mit 1 m Tiefe angenommen, wodurch ein quasi dreidimensionales Modell entstand. Betrachtet man die Saugspannungskurve des modellierten Erdbodens (siehe Anhang Abschnitt 9.5), ist erkennbar, dass das Material eine freie Wassersättigung von 419 kg/m^3 bei einem Kapillardruck von 1 kPa aufweist. Es wurden vier unterschiedlich stark saugende Varianten mit Saugspannungswerten von 10 kPa bis 50 kPa an der Bodenrandbedingung durchgerechnet. Die Feuchteverteilungen der Varianten sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt.

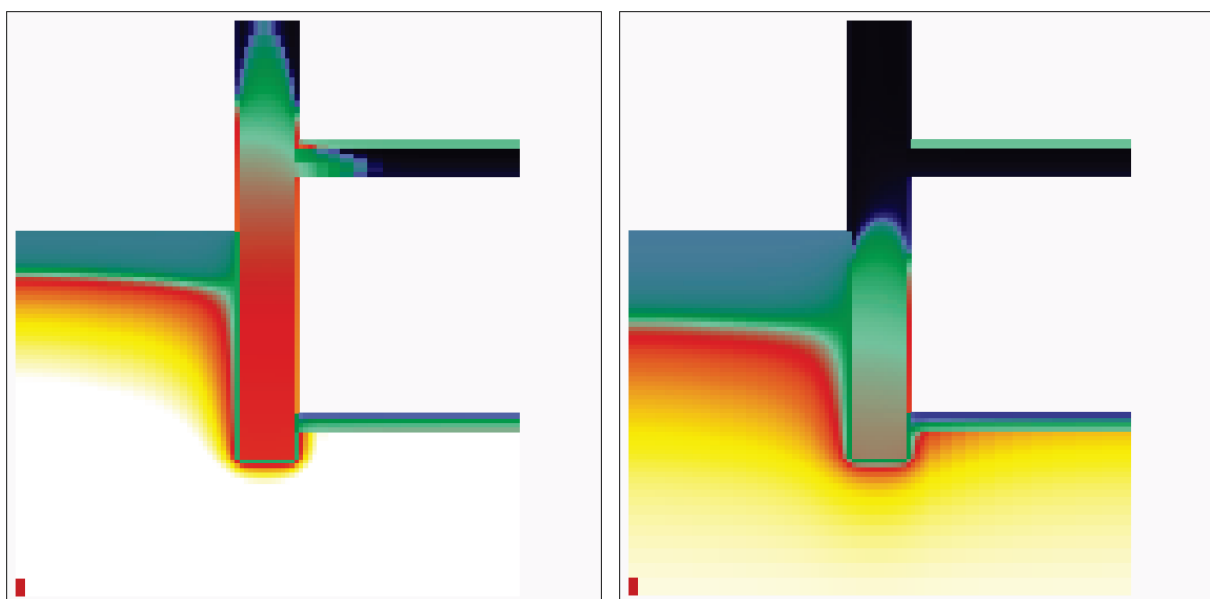


Abbildung 36: Verteilung des Wassergehalts im quasistationären Zustand bei einer Saugspannung von 10 kPa (links) und 25 kPa (rechts) an der Bodenrandbedingung

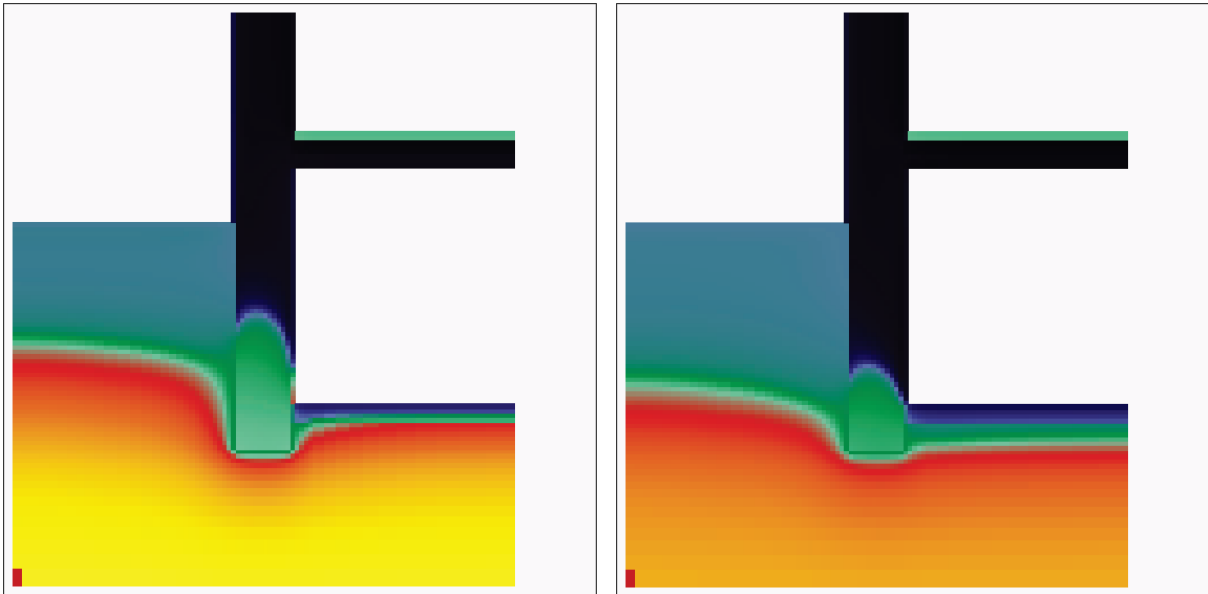


Abbildung 37: Verteilung des Wassergehalts im quasistationären Zustand bei einer Saugspannung von 35 kPa (links) und 50 kPa (rechts) an der Bodenrandbedingung

Für die weiteren Simulationen des hygrothermischen Bauteilmodells (siehe Abschnitt 5.6) wurde die Variante mit einer Saugspannung von 25 kPa an der Bodenrandbedingung gewählt. Aufgrund der Simulationsdauer und der Komplexität sämtlicher Eingangsparameter wurden keine Varianten mit unterschiedlichen Bodenfeuchten untersucht.

Anfangsbedingungen für die Simulation und Simulationsdauer

Für die reale Rechendauer eines Simulationsmodells ist die Wahl der Anfangsbedingungen ausschlaggebend. Dies betrifft vor allem den Startwert des Wassergehalts der einzelnen Zellen des Modells, da die Änderung des Feuchtefeldes im Vergleich zur Änderung des Temperaturfeldes sehr langsam vor sich geht. Während Temperaturfelder in Bauteilen sich binnen weniger Tage an die Umgebung anpassen, kann der Ausgleich von Feuchtefeldern mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Für die Auswertung ist somit die Rechenzeit in Form von Simulationszeitschritten pro reale Zeiteinheit von großer Relevanz. Im vorliegenden Fall wurde zur Erreichung eines quasistationären Zustands der simulierte Zeitraum mit 70 Jahren festgelegt.

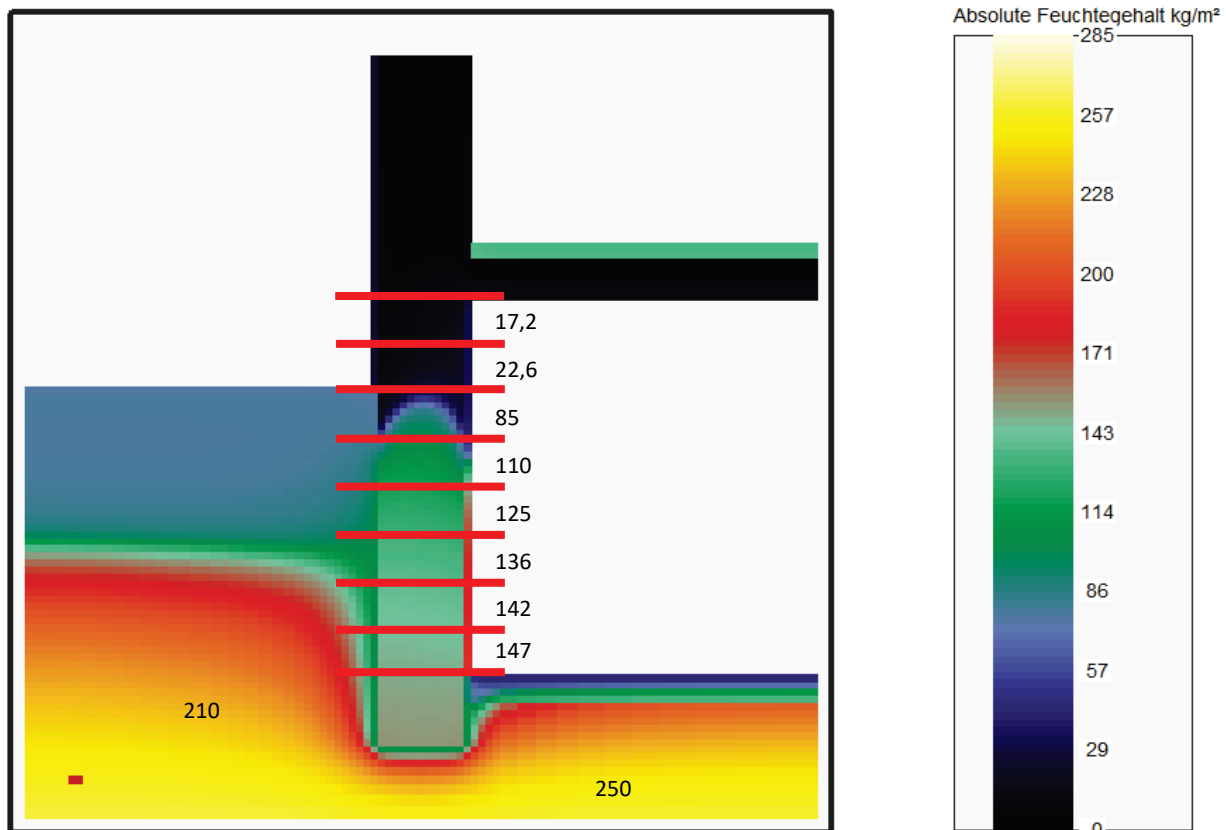


Abbildung 38: Festsetzung der Anfangsbedingungen für den Wassergehalt des Bodens und des Mauerwerks, basierend auf den Testsimulationen; es ist der eingeschwungene Zustand nach 70 Jahren dargestellt.

Basierend auf den Testsimulationen der Bodenrandbedingung wurde das Ergebnis der Feuchteverteilung mit einer Saugspannung von 25 kPa analog Abbildung 36 als Anfangsbedingung für die Bauteilsimulationen gewählt. Die Materialblöcke wurden in Schichten unterteilt und mit den in Abbildung 38 dargestellten Feuchtegehalten beaufschlagt.

Die hier dargestellte Feuchteverteilung entspricht dem quasistationären Zustand der Simulation nach 70 Jahren. Es wurde angenommen, dass dieser Zustand der Kellerbauteile in der Realität dem Startzeitpunkt einer Nutzung als Wohnung entspricht.

Diese Methodik entspricht ebenfalls einer Annahme und einer Vereinfachung der realen Situation. Die Annahmen wurden jedoch mittels Mauerfeuchtemessungen an einem realen Objekt auf deren Plausibilität überprüft. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Dauer der Simulation des Kellermodells gemäß 4.6.2 wurde mit zehn Jahren festgesetzt. Abhängig von den Feuchtelasten und den Lüftungsszenarien erreicht die Simulation nach drei bis acht Jahren einen quasistationären Zustand. Um eine einheitliche Auswertung zu ermöglichen, wurde bei allen Simulationen das zehnte Jahr ausgewertet. Die Methodik der quasistationären Ergebnisfindung ist eine bewährte Vorgangsweise zur Interpretation und Vergleichbarkeit von Simulationsdaten.

5 Ergebnisse

5.1. Sind die untersuchten Souterrain-/Gartenwohnungen „space4free“?

Basierend auf den Modellentwicklungen im Projekt „Sanierungsbauteilkatalog“ [ZEL 17] wurde ein verkleinertes, doppelt symmetrisches Simulationsmodell mit dem Simulationsprogramm HAM4D_VIE erstellt. Dabei wurden die in Abschnitt 4.6.5 beschriebenen Randbedingungen angesetzt, wobei jedoch der Keller als unsaniert bzw. ungenutzt angenommen wurde. Die Klimarandbedingung im Keller wurde als kontrolliert belüftet festgelegt. Es wurde ein konstanter Luftwechsel mit der Außenluft simuliert und in sechs Abstufungen variiert. Dadurch wird ersichtlich, wie stark ein Gründerzeitkeller infolge des Außenluftwechsels im Winter auskühlen kann (siehe Abbildung 39).

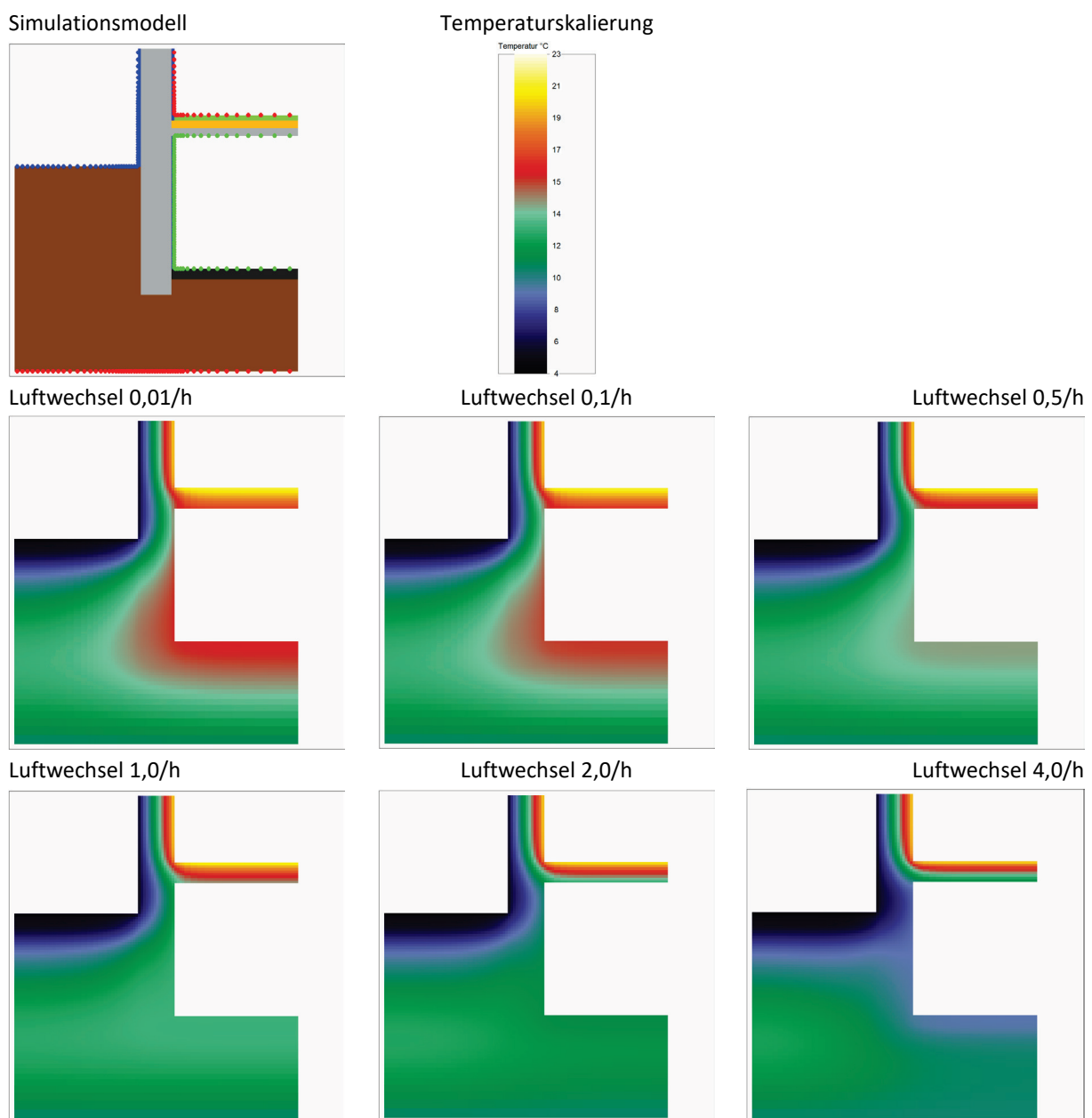


Abbildung 39: Temperaturfeld im Kernwinter (31.12., 23 Uhr) im Querschnitt eines unsanierten Gründerzeitkellers bei Variation des Luftwechsels von 0,01 bis 4,0 pro Stunde

Betrachtet man den Temperaturverlauf über ein Jahr, ist der Einfluss des Luftwechsels noch deutlicher zu erkennen. In Abbildung 40 sind die Temperaturverläufe aller Varianten als gleitender Wochenmittelwert dargestellt. Als Referenz ist die Temperaturkurve der Außenklimarandbedingung angeführt.

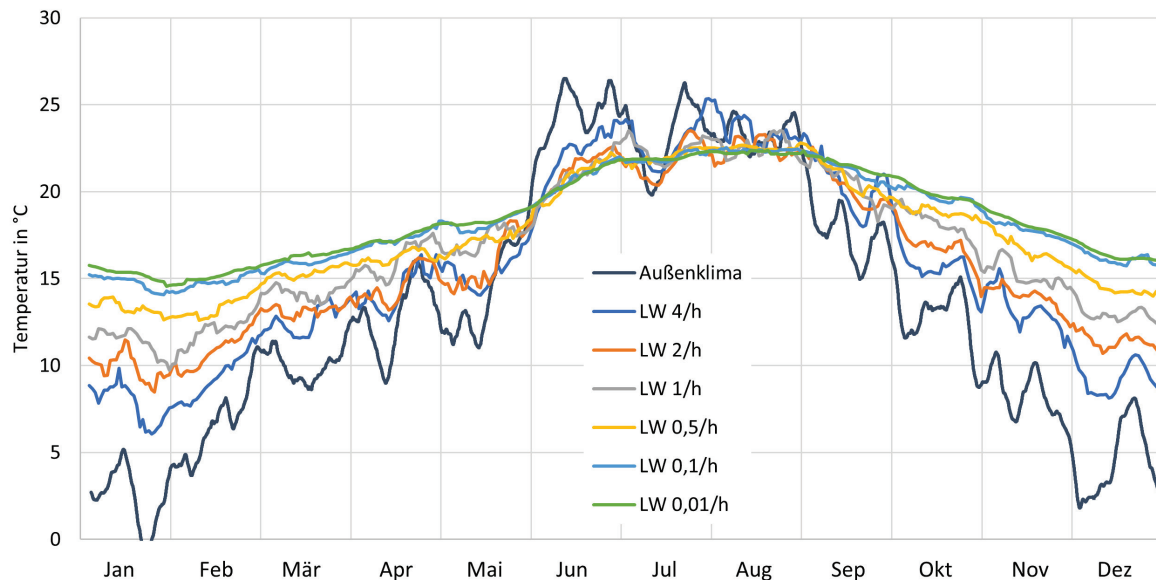


Abbildung 40: Lufttemperatur als gleitender Wochenmittelwert in einem unsanierten Gründerzeitkeller bei Variation des Luftwechsels (LW) von 0,01 bis 4 pro Stunde

Ein weiteres Ergebnis dieser Simulationen war der Wärmestrom durch die Kellerdecke. Dieser wurde aus dem Wärmestrom der Innenrandbedingung der Erdgeschoßwohnung berechnet, indem die Wärmeverluste durch die Außenwand abgezogen wurden. Die Wärmebrückeneffekte am Deckenanschluss wurden vernachlässigt. In Abbildung 41 ist das Simulationsmodell zur Bestimmung der Wärmeverluste durch die Kellerdecke und durch die Außenwand dargestellt. Um den spezifischen Wärmestrom angeben zu können, muss die Geometrie des Modells berücksichtigt werden. Die Außenrandbedingung ist blau, die Innenrandbedingung im Keller grün und die Innenrandbedingung in der Erdgeschoßwohnung rot dargestellt. Der Wärmestrom durch die Kellerdecke ergibt sich gemäß folgender Formel:

$$Q_{Decke} = Q_i - U_{Wand} \cdot A_{Wand} \cdot (T_{i,eff} - T_{e,eff})$$

mit

| | |
|-------------|---|
| Q_{Decke} | Wärmestrom durch die Kellerdecke in W |
| Q_i | gesamter Wärmestrom durch die Innenrandbedingung der Erdgeschoßwohnung |
| U_{Wand} | Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand im Bereich des Erdgeschoßes |
| A_{Wand} | Fläche der Außenwand im Bereich der Innenrandbedingung der Erdgeschoßwohnung |
| $T_{i,eff}$ | effektive Oberflächentemperatur an der Innenrandbedingung der Erdgeschoßwohnung |
| $T_{e,eff}$ | effektive Oberflächentemperatur an der Außenrandbedingung |

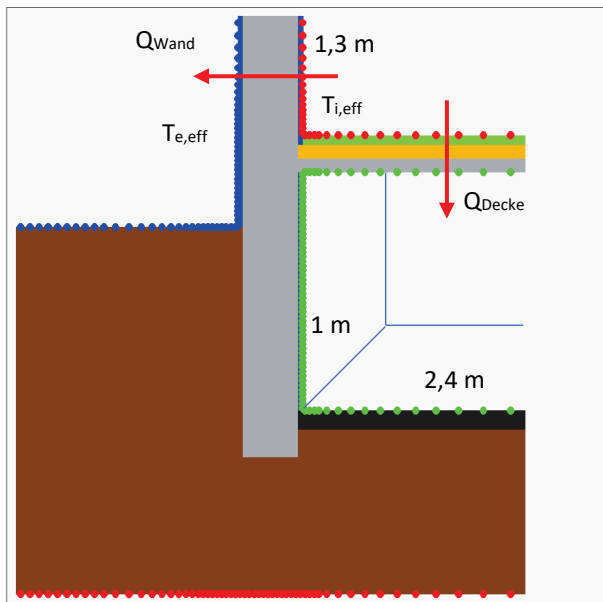


Abbildung 41: Simulationsmodell zur Bestimmung der Wärmeverluste durch die Kellerdecke und die Außenwand

Der Wärmestrom durch die Kellerdecke wurde für jeden Ausgabeschritt des Simulationsprogramms – in diesem Fall für Tagesmittelwerte – berechnet. Um klimabedingte Schwankungen auszublenden, wurde ein gleitender Wochenmittelwert erstellt. Der Verlauf des Wärmestroms über ein Jahr ist im Vergleich aller simulierten Varianten mit unterschiedlichem Luftwechsel in Abbildung 42 dargestellt.

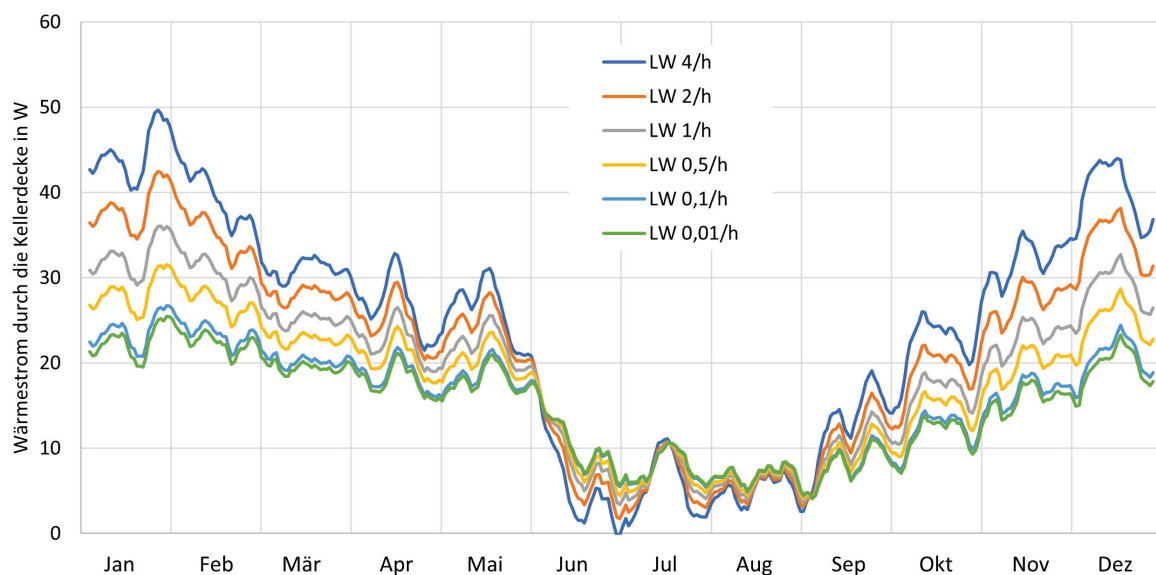


Abbildung 42: Wärmestrom durch die Kellerdecke als gleitender Wochenmittelwert bei Variation des Luftwechsels (LW) von 0,01 bis 4 pro Stunde

Aus den ermittelten Wärmestromverläufen wurde für jede Variante ein mittlerer jährlicher Wärmestrom durch die Kellerdecke bestimmt. Dieser kann nach Berücksichtigung der Modellgeometrie als Wärmestromdichte in W/m^2 angegeben und in weiterer Folge als spezifischer Wärmestrom auf ein Jahr bezogen werden. Somit wurde eine Vergleichsgröße geschaffen, um die simulierten Wärmeverluste des Originalbestands mit den Werten des Energieausweises bzw. mit realen Verbrauchsdaten ausgewählter Wohnungen vergleichen zu können. Die Wärmestromdichte sowie der spezifische Wärmestrom durch die Kellerdecke sind in der folgenden Abbildung 43 für alle

simulierten Varianten dargestellt. Sie zeigen die Bandbreite der möglichen Wärmeverluste durch die Kellerdecke bei unsanierten Gründerzeitkellern auf.

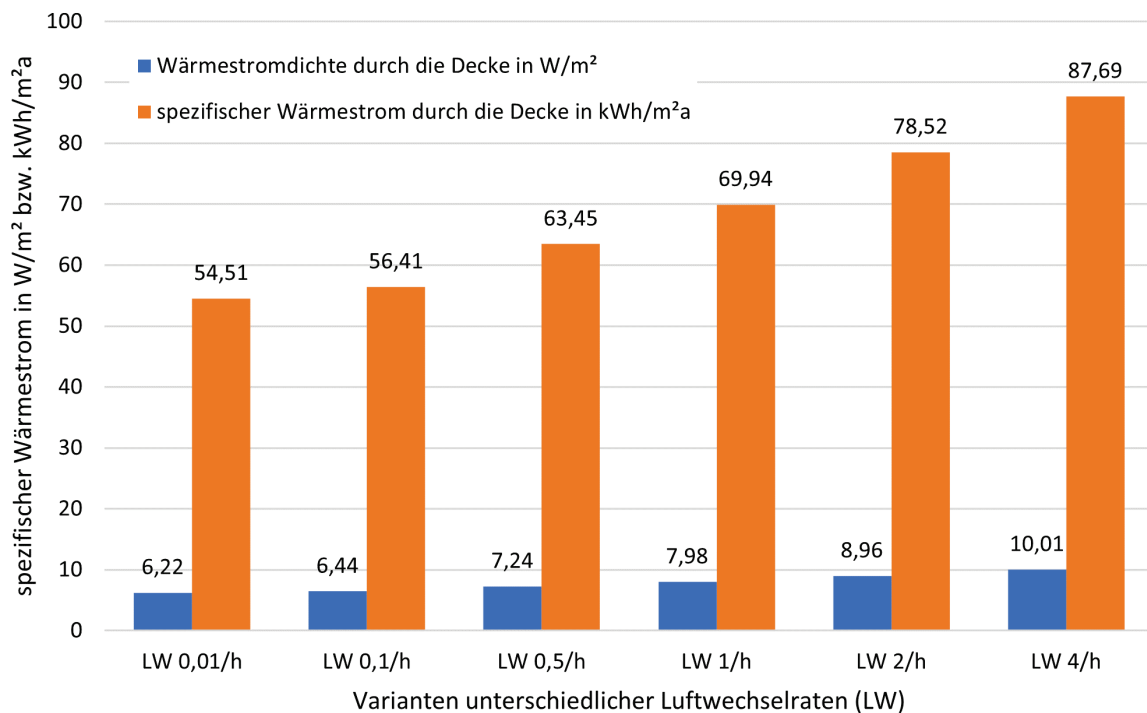


Abbildung 43: Wärmestromdichte bzw. spezifischer Wärmestrom durch die Kellerdecke in Abhängigkeit des Luftwechsels der Kellerraumluft

Die Kellerbereiche von Gebäude A und Gebäude B waren vor der Sanierung in einem vergleichbaren Zustand und wurden auch nach annähernd gleichen Plänen in Souterrain-/Gartenwohnungen umgebaut. Es wurden vier Wohnungen ausgewählt, deren Energieausweis sowie deren reale Verbrauchswerte mit den Berechnungen des Wärmestroms durch die Kellerdecke im unsanierten Zustand verglichen wurden. Die Energiekennzahlen gemäß Energieausweis und die realen Verbrauchsdaten für Raumheizung und Warmwasser sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Übersicht der Wärmeverbräuche aus den Energieausweisberechnungen der Planung sowie aus realen Wärmeverbrauchsabrechnungen ausgewählter Souterrain-/Gartenwohnungen

| | Einheit | Wohnung 1 | Wohnung 2 | Wohnung 3 | Wohnung 4 |
|--|---------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| HWB_{Ref,SK} | kWh/m²a | 60,8 | 52,4 | 54,3 | 54,1 |
| HWB_{SK} | kWh/m²a | 45,1 | 36,9 | 38,9 | 50,5 |
| HEB_{SK} | kWh/m²a | 71,1 | 59,3 | 62,1 | 83,2 |
| EEB_{SK} | kWh/m²a | 87,5 | 75,7 | 78,5 | 99,6 |
| Wohnungsfläche | m² | 87,9 | 102,5 | 87,6 | 74,1 |
| realer Wärmeverbrauch Raumheizung | kWh/m²a | 97,8 | 43,2 | keine Daten | 41,9 |
| realer Wärmeverbrauch Warmwasser | kWh/m²a | 28,3 | 43,3 | keine Daten | 55,1 |

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, ist ein Vergleich mit den Energieausweiskennzahlen nicht direkt möglich. Es wurden daher sowohl der HWB als auch der EEB als Vergleichswerte angegeben, wobei der HWB_{SK} (orange markiert) als geeignetste Vergleichsgröße zu betrachten ist. Dieser beinhaltet zwar keine Verteilverluste, berücksichtigt jedoch die in allen Wohnungen eingesetzte hocheffiziente Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung.

Im vorliegenden Vergleich geht es vor allem darum, zu zeigen, dass die Wärmeverluste durch die Kellerdecke eines unsanierten Gründerzeithauses ungefähr gleich groß oder größer sind als der Wärmeverbrauch für die Raumheizung bei durchschnittlichen Souterrain-/Gartenwohnungen, wie sie von Gassner & Partner geplant und umgesetzt werden. In den vorliegenden Auswertungen ist der Wert des geringsten Wärmeverlusts im Originalbestand von $54,51 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Variante LW 0,01/h) annähernd gleich groß wie der schlechteste HWB_{SK} -Wert von $50,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Wohnung 4) aller Vergleichswohnungen. Im Hinblick auf die realen Verbrauchsdaten für die Raumheizung ist der Wert der Wohnung 4 am niedrigsten und liegt deutlich unter dem geringsten Wärmeverlust aller Bestandsvarianten.

Betrachtet man die Bandbreite der Simulationsdaten und die Bandbreite der Energieausweisdaten, steht fest, dass man die neu errichteten Souterrain-/Gartenwohnungen im Sinne des Projekttitels als „space4free“ bezeichnen kann.

5.2. Mauerwerksuntersuchungen an Gebäuden

Sämtliche Sanierungsprojekte von Gassner & Partner sind im Besitz der Ulreich Bauträger GmbH und werden bereits Jahre vor der Sanierungsdurchführung, meist im Zuge einer Einreichplanung, einer Gebäudeaufnahme unterzogen. Dabei werden in der Regel auch Mauerwerksuntersuchungen durchgeführt, um die Mauerfeuchtigkeit, die Tragfähigkeit und mögliche Salzbelastungen zu ermitteln. Im Folgenden werden anhand dreier Beispiele die Ergebnisse von Mauerfeuchteuntersuchungen vorgestellt. Die Bestimmung der Mauerfeuchte bzw. des Durchfeuchtungsgrads des Mauerwerks erfolgte durch die Entnahme von Bohrmehlproben an ausgewählten Positionen im Keller und gegebenenfalls auch im Erdgeschoß.

5.2.1. Mauerfeuchtemessungen am Gebäude Neilreichgasse 3-5

Im Keller des Gebäudes Neilreichgasse 3-5 (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45) wurden vor der Sanierungsmaßnahme umfangreiche Mauerwerksuntersuchungen zur Bestimmung der Mauerfeuchtigkeit und der Salzbelastung vorgenommen. Die Bohrmehlentnahme erfolgte am 23.5.2017 und am 6.6.2017. Es wurden 14 Messprofile in drei Höhen und drei Tiefen entnommen. Die Auswertung der Proben erfolgte im Hochbaulabor der TU Wien. Zum Entnahmzeitpunkt war der Kellerbereich am Beginn der Rohbauphase. Der Verputz war bereits abgeschlagen und der Keller war gut durchlüftet. Es ist daher nicht sichergestellt, dass die gemessene Mauerfeuchte dem Originalzustand entspricht. Es wurde noch keine Feuchtigkeit in Form von Beton oder Verputz eingebracht.



Abbildung 44: Zustand des Kellers bei der Probenentnahme

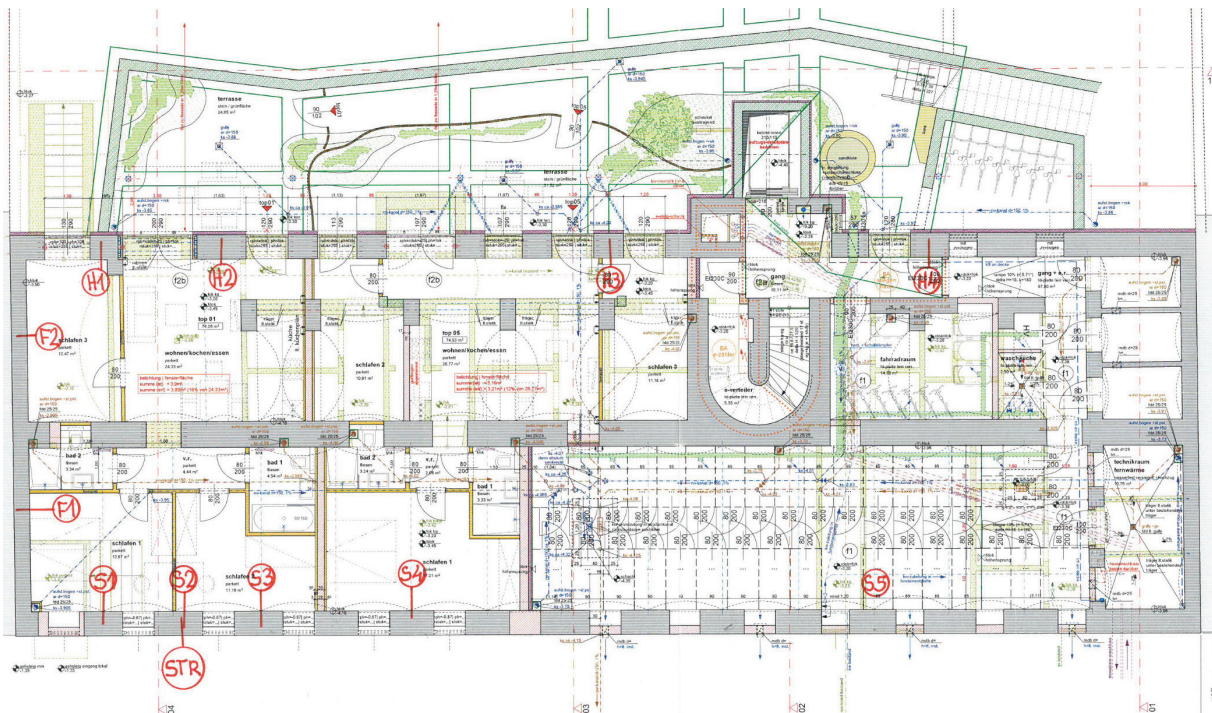


Abbildung 45: Grundriss des Kellers Neilreichgasse 3-5 mit Markierungen der Probeentnahmestellen

Die Ergebnisse der Mauerfeuchtemessungen zeigen eindeutige Feuchteverteilungen. In Abbildung 46 und in Abbildung 47 sind die Feuchtegehalte im Mauerwerk nach ihrer Lage im Querschnitt und ihrer Tiefe in der Wand dargestellt. Pro Messquerschnitt sind die Positionen „unten“ (u) in 5 cm unter der fertigen Fußbodenoberkante (FFOK), „Mitte“ (m) in ca. 115 cm über der FFOK und „oben“ (o) in ca. 235 cm über der FFOK angeführt. Jede Messposition besteht aus drei Messtiefen. Bei fast allen Messquerschnitten ist eine abnehmende Feuchteschichtung von unten nach oben erkennbar. Dies belegt zumindest eine geringe Grundfeuchte im Boden, die in das Mauerwerk aufsteigt. Gleichzeitig wird an manchen Messquerschnitten deutlich, dass der Feuchtegehalt in der Mauertiefe geringer ist als an der Oberfläche. Das kann auf eine Anfeuchtung infolge kalter Bauteile hinweisen.

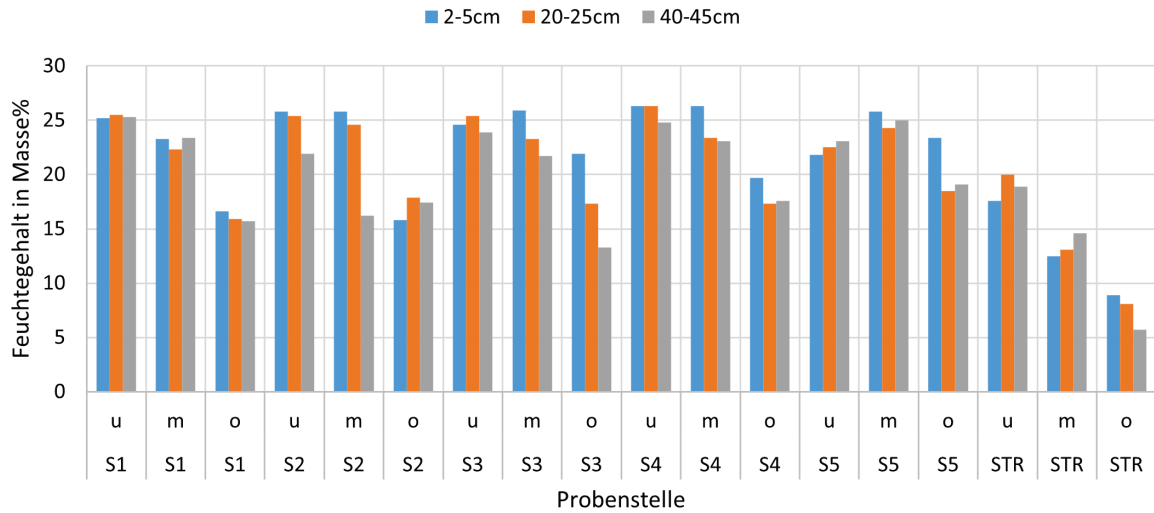


Abbildung 46: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben der straßenseitigen Entnahmestellen untergliedert nach Probenstelle unten (u)/Mitte (m)/oben (o)

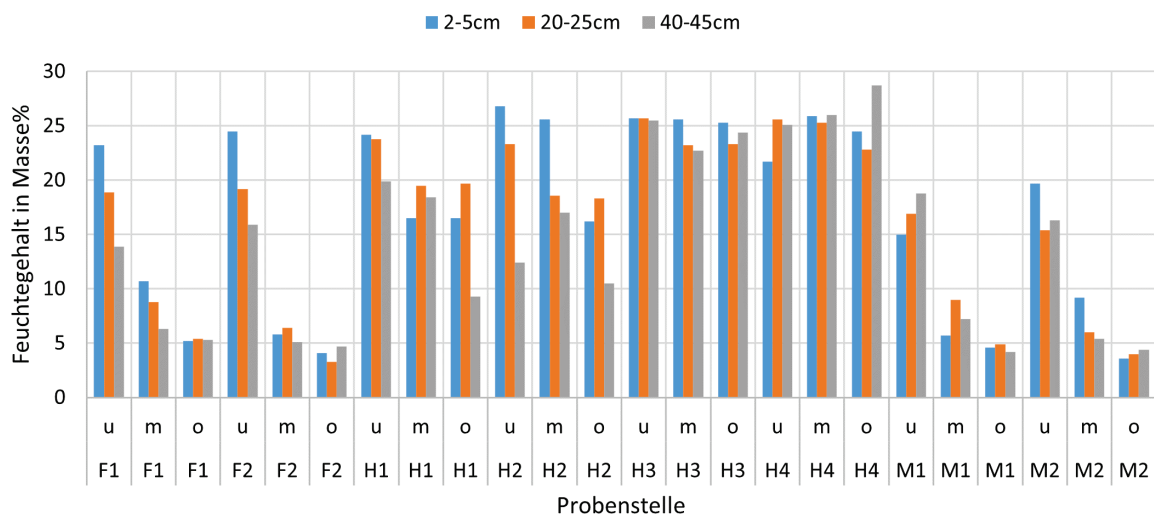


Abbildung 47: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an der Feuermauer (F), an der Hofmauer (H) und an der Mittelmauer (M) untergliedert nach Probenstelle unten (u)/Mitte (m)/oben (o)

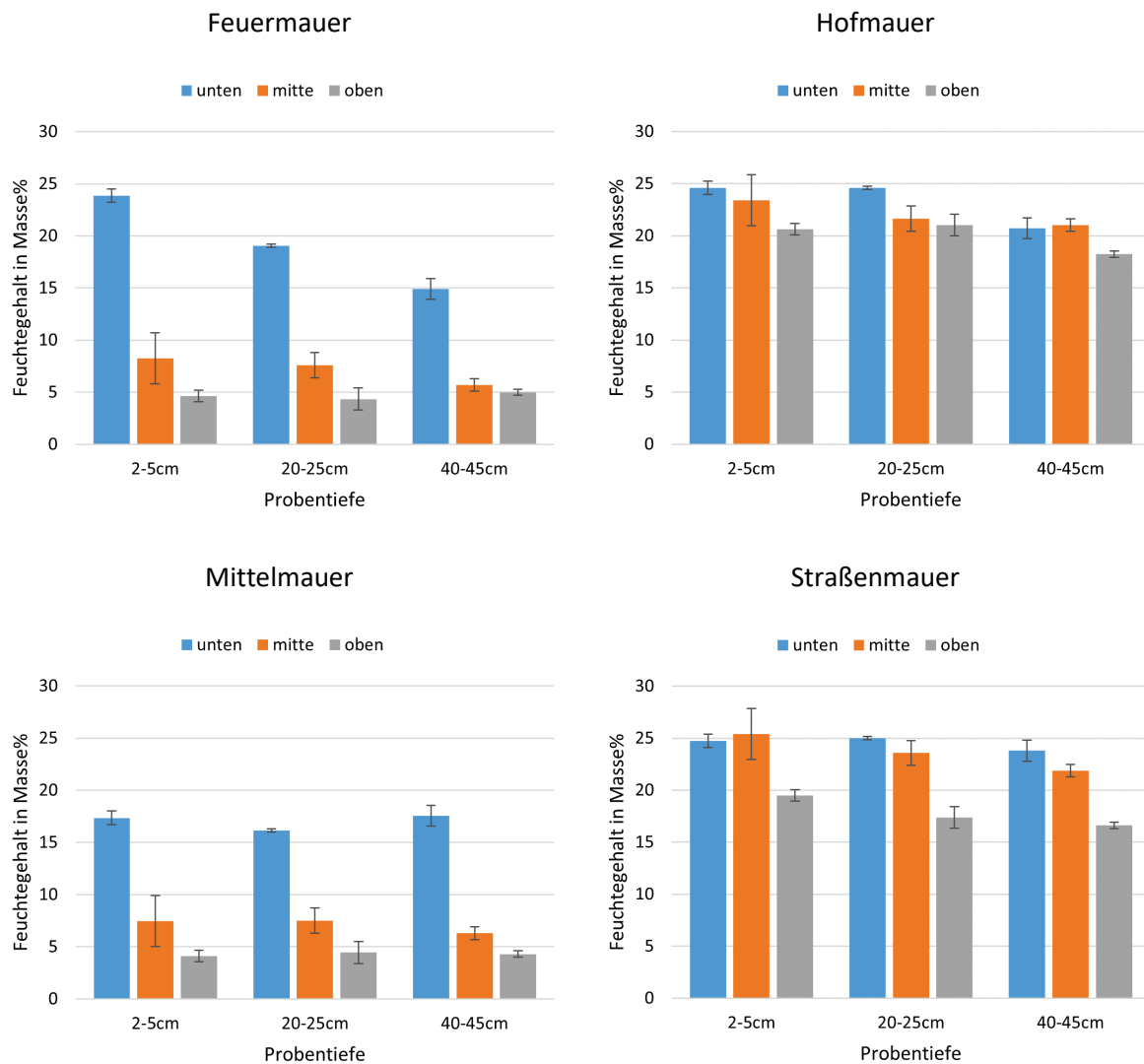


Abbildung 48: Mittelwerte und Standardabweichungen der Feuchtegehalte aller Messstellen je Bauteil sowie in Abhängigkeit der Lage und der Probentiefe

Um die Ergebnisse übersichtlicher vergleichen zu können, wurden sie nach Bauteilen sortiert und jeweils nur der Mittelwert und die Standardabweichung pro Messposition angegeben. Abbildung 48 zeigt die Feuchtegehalte nach Bauteilen sortiert. An der Feuermauer und an der Mittelmauer ist eine deutliche Feuchteschichtung in der Höhe erkennbar, wobei diese Bauteile an der mittleren und der oberen Messposition annähernd trocken sind. Die Feuchteschichtungen in der Tiefe sind bei beiden Bauteilen nur geringfügig unterschiedlich. Die Feuermauer ist im unteren Bereich an der Oberfläche geringfügig feuchter als in tieferen Schichten. An den Auswertungen der Hof- und der Straßenmauer ist erkennbar, dass nur eine minimale horizontale Feuchteschichtung vorhanden ist. Im Vergleich zu Feuer- und Mittelmauer sind die Hof- und Straßenmauer bis zur oberen Messposition erdberührt. Die Hofmauer wurde erst wenige Tage vor der Probenentnahme freigelegt, da das Hofniveau, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, abgesenkt wurde.

Bei allen dargestellten Messpositionen fällt auf, dass die Standardabweichung der Messwerte relativ gering ist. Weiters ist zu erkennen, dass Maximalwerte der Standardabweichung in den mittleren oberflächennahen Messpositionen auftreten. Es ist anzunehmen, dass in diesen Bereichen ein unterschiedlich hoher Feuchtehorizont verläuft, während die Wände in den oberen Bereichen nahezu

trocken und in den unteren Bereichen gleichmäßig feucht sind. Dies wird durch die Berechnung der Durchfeuchtungsgrade (siehe Anhang, Abschnitt 9.3) an den einzelnen Messpositionen bestätigt.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Analysen der Bohrproben ist die hohe Materialfeuchte an der Hofmauer. Diese ist insofern problematisch, da die Fassade der Hofmauer mit einem Wärmedämmverbundsystem versehen wird und somit eine Trocknung nach außen nur bedingt möglich ist.

5.2.2. Mauerfeuchtemessungen am Gebäude Erlgasse 38

Am Gebäude Erlgasse 38 wurden im Jahr 2016 vor den Sanierungsmaßnahmen ähnliche Untersuchungen der Mauerfeuchte durchgeführt wie am Gebäude Neilreichgasse 3-5. Die Probenentnahmen erfolgten je Querschnitt in zwei unterschiedlichen Höhen und in zwei Tiefen gemäß der Planskizze in Abbildung 49.

- In einer Höhe von ca. 30 cm über dem aktuellen Rohdeckenniveau, somit annähernd in der Höhe der fertigen Fußbodenoberkante.
- In ca. 130 cm Höhe über dem aktuellen Rohdeckenniveau, nahe unter dem fertigen Fensterbrett.
- Jeweils in einer Tiefe von 2 bis 7 cm und 20 bis 25 cm.

Die Bohrmehlentnahmen fanden zu einem Zeitpunkt statt, als der Innenhof noch im Originalzustand war. Die hofseitige Außenwand war daher noch erdanliegend und den gleichen Randbedingungen ausgesetzt wie die straßenseitige Außenwand. Umso erstaunlicher ist der Messwert der Materialfeuchtigkeit am Hofpfeiler in Abbildung 51, da dieser deutlich unter den Messergebnissen an der straßenseitigen Außenwand liegt. Möglicherweise sind die Ergebnisse aber auch nicht miteinander vergleichbar, weil die Bohrmehlentnahme straßenseitig in einer 40 cm tiefen Fensternische und somit in der äußeren Wandhälfte und hofseitig an einem 90 cm dicken Pfeiler und somit in der inneren Wandhälfte vorgenommen wurde.

Im August 2020 wurde während eines Wohnungsleerstands an denselben Wandstellen wie 2016 eine weitere Mauerfeuchtemessung durchgeführt. Die Proben wurden wieder in denselben zwei Tiefen und ungefähr in denselben Höhen entnommen. Aufgrund der unterschiedlichen Mauerdicken am Pfeiler und im Parapetbereich wurden auch straßenseitig Proben an einem Pfeiler entnommen. Alle Probenentnahmestellen bzw. die Messquerschnitte sind in der folgenden Abbildung 49 dargestellt.

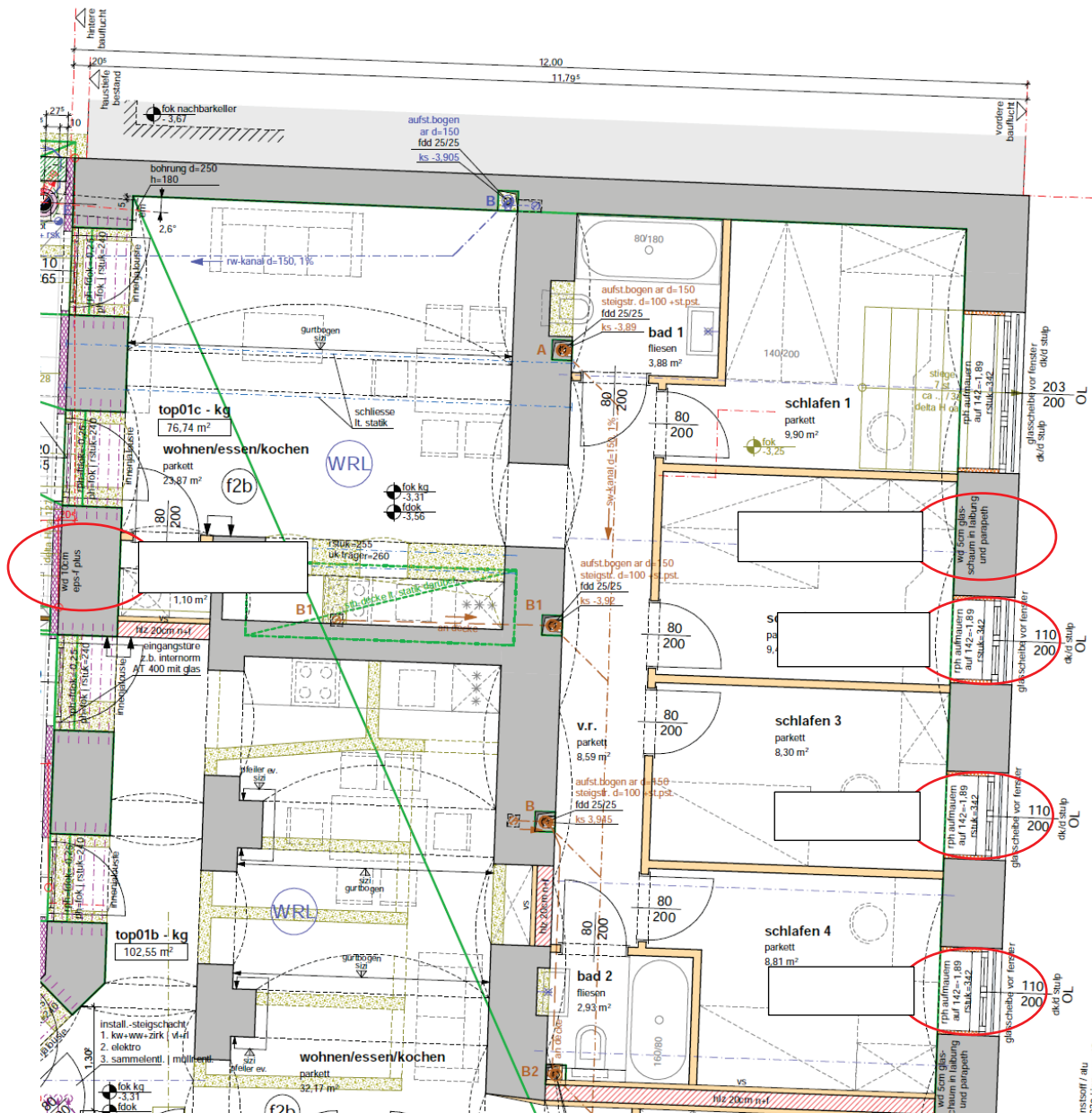


Abbildung 49: Grundriss der Souterrain-/Gartenwohnung Erlgasse 38, Top 1c mit den Markierungen der Probenentnahmestellen

In den Diagrammen der Abbildung 50 und Abbildung 51 werden die Mauerfeuchtemesswerte von 2016 und 2020 miteinander verglichen. Während im Jahr 2016 bei den straßenseitigen Messungen in den Parapetbereichen noch Unterschiede zwischen den unteren und den oberen Messpositionen feststellbar waren, sind die Messwerte im Jahr 2020 überall annähernd gleich. Da die Parapetbereiche im Zuge der Kellersanierung bzw. des Wohnungsausbaus mit einer dampfdichten Innendämmung aus 5 cm dicken Schaumglasplatten verkleidet wurden, hat sich die Mauerwerksfeuchtigkeit hinter der Dämmung auf ein (hohes) Niveau ausgeglichen.

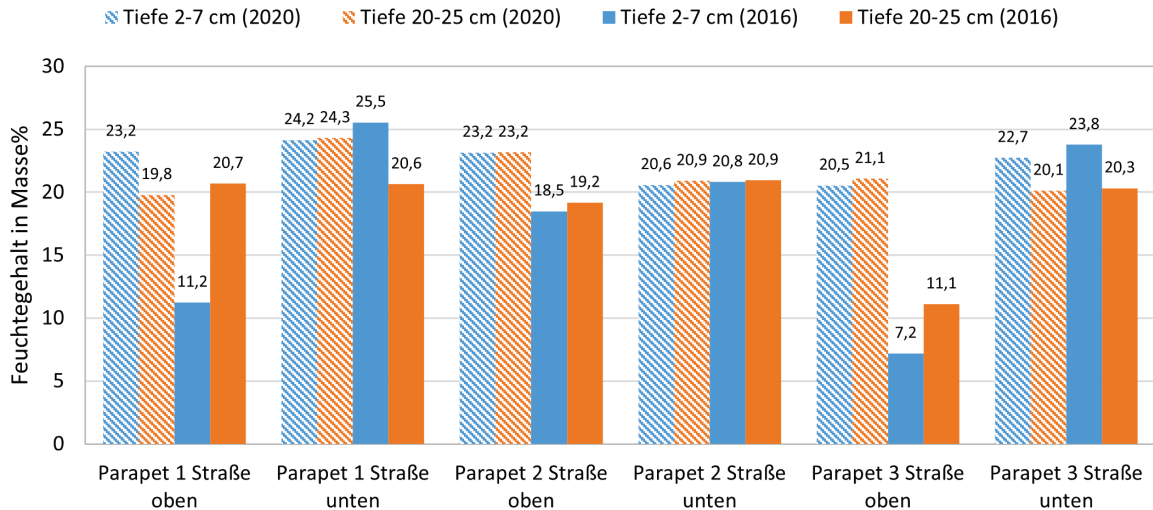


Abbildung 50: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an den straßenseitigen Messstellen vor dem Baustart im Jahr 2016 und drei Jahre nach der Gebäudefertigstellung im Jahr 2020

Am hofseitigen Mauerpfeiler ist der Feuchtegehalt ebenfalls angestiegen, wobei an dieser Position immer noch eine vertikale Feuchteschichtung mit nach oben hin abnehmender Materialfeuchte erkennbar ist. Aufgrund der geringen Stichprobengröße von nur einem Messquerschnitt ist die Interpretation dieser Ergebnisse jedoch schwierig. Es kann nur vermutet werden, dass die Montage des Wärmedämmverbundsystems an der ursprünglich erdanliegenden Hofmauer die Feuchtehorizonte im Mauerwerk ansteigen ließ.

Die Messwerte von 2020 am straßenseitigen Pfeiler ähneln jenen an den Parapeten im Jahr 2016. Aufgrund der großen Pfeilerdicke ist der Einfluss des anliegenden Erdreichs minimal. Die verbleibende geringe Mauerfeuchte kann nach innen abtrocknen und ist nur geringfügig von unten nach oben geschichtet.

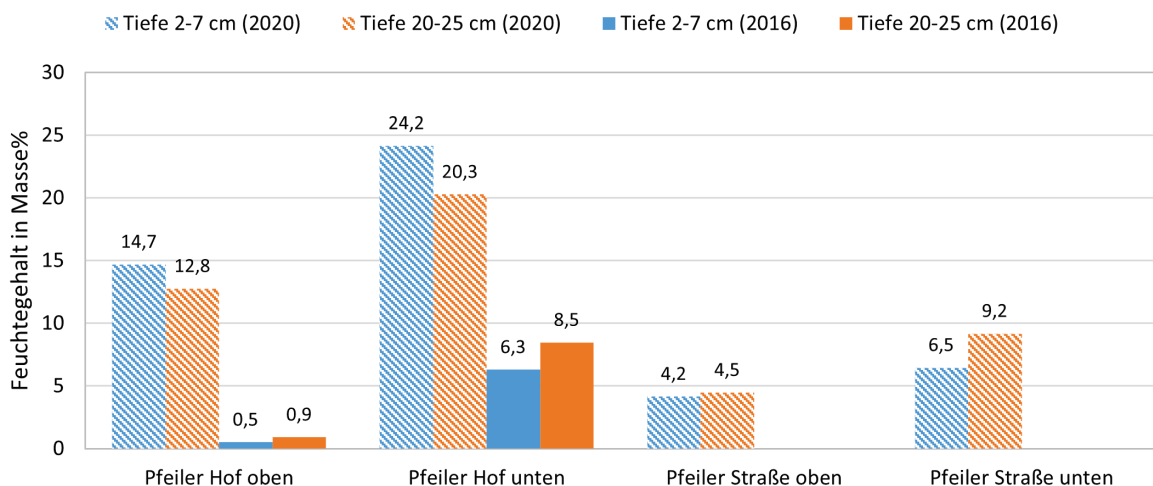


Abbildung 51: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an den hofseitigen Messstellen vor dem Baustart im Jahr 2016 und drei Jahre nach der Gebäudefertigstellung im Jahr 2020

5.2.3. Rasterfeuchtemessungen

An mehreren Objekten wurden Rasterfeuchtemessungen zur bildlichen Darstellung der Feuchteverteilung in einem gesamten Wandabschnitt durchgeführt. Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, wurde ein Mikrowellenfeuchtemessgerät vom Typ Moist 350 B verwendet. Es wurden zwei Messtiefen erfasst. Der Messraster war auf einen Messpunktabstand von ca. 10 bis 20 cm ausgerichtet, je nach Gegebenheiten des Mauerwerks. Es wurde immer an Mauerziegeln gemessen, um Messabweichungen durch Inhomogenitäten so gut wie möglich zu vermeiden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen am Gebäude Fröbelgasse 6 vorgestellt.

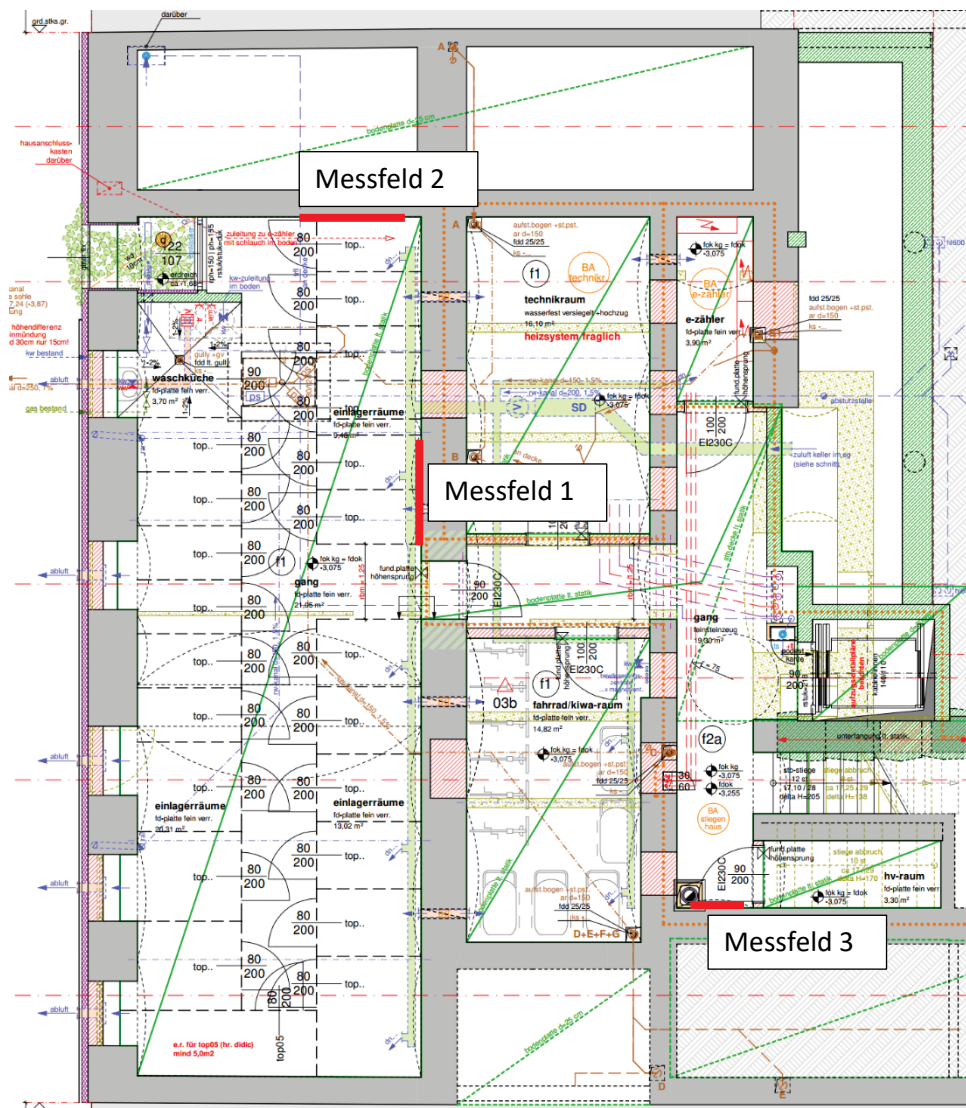


Abbildung 52: Grundriss des Kellergeschoßes des Gebäudes Fröbelgasse 6 mit Markierung der Messfelder

Die Rasterfeuchtemessung wurde im Kellergeschoß an drei ausgewählten Positionen durchgeführt. Das Messfeld 1 liegt an der Mittelmauer. Das Messfeld 2 liegt an der Feuermauer im Bereich der Hofeinfahrt. Das Messfeld 3 liegt an einer erdberührten Wand zu einem Lichthof unter dem Stiegenhaus.

Je Messfeld wurden zwei Messtiefen untersucht. Mit dem Oberflächenmesskopf wurde der Feuchtegehalt der Ziegelwand bis in eine Tiefe von ca. 5 cm, mit dem Tiefenmesskopf bis in eine Tiefe

von ca. 30 cm gemessen. Es wurde der Feuchtegehalt in kg/m^3 ermittelt, basierend auf den Materialkennwerten des „Mauerziegels“, der im Messgerät hinterlegt ist. Die Trockenrohdichte stimmt mit jener des tatsächlichen Ziegels ungefähr überein, die anderen Parameter, wie beispielsweise die Ausgleichs- und die Sättigungsfeuchte, weisen aufgrund der großen Streuung keine genaue Übereinstimmung auf. Dennoch geben die Ergebnisse der Rasterfeuchtemessung einen Anhaltspunkt für die Beurteilung der Feuchtezustände im Mauerwerk.

Messfeld 1: Mittelmauer

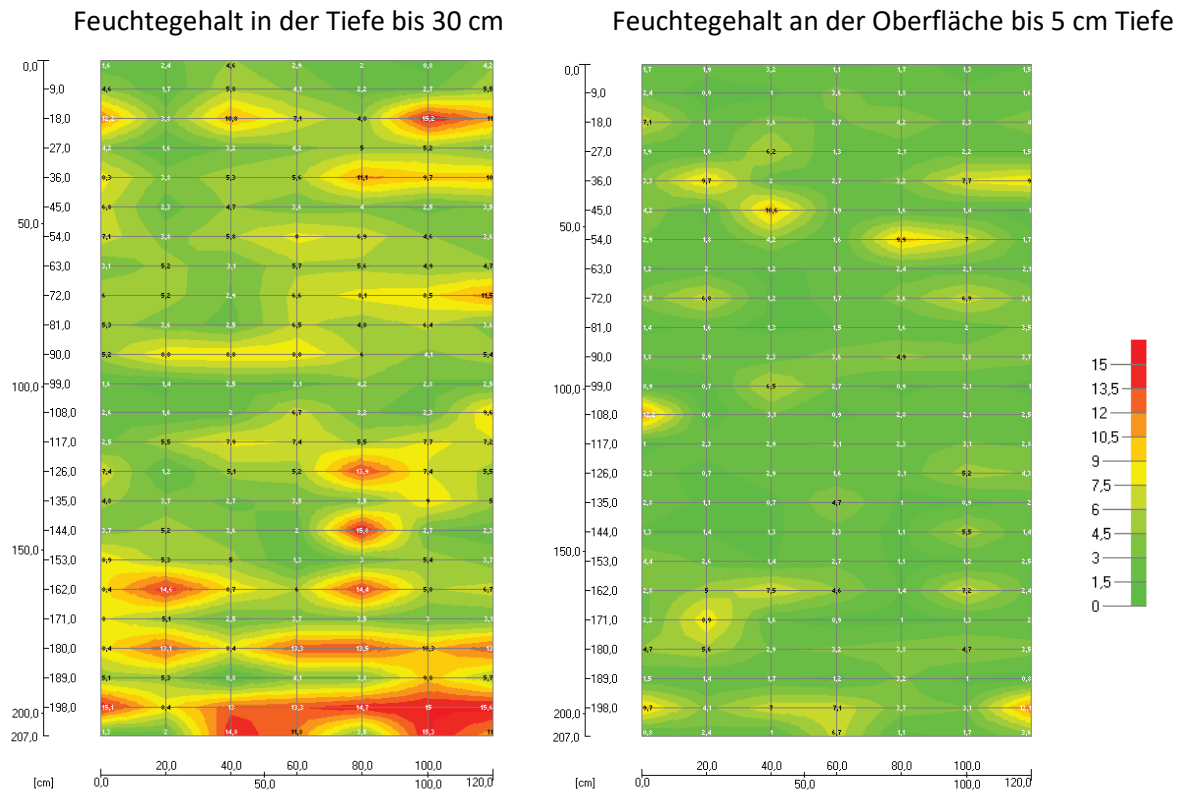
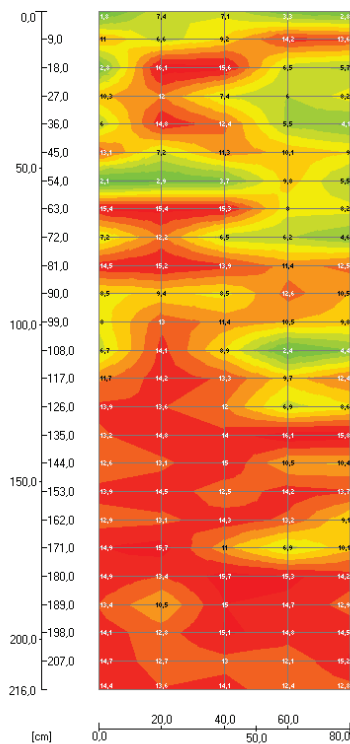


Abbildung 53: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 1 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts)

Messfeld 2: Mauer unter der Einfahrt gegen erdberührt

Feuchtegehalt in der Tiefe bis 30 cm



Feuchtegehalt an der Oberfläche bis 5 cm Tiefe

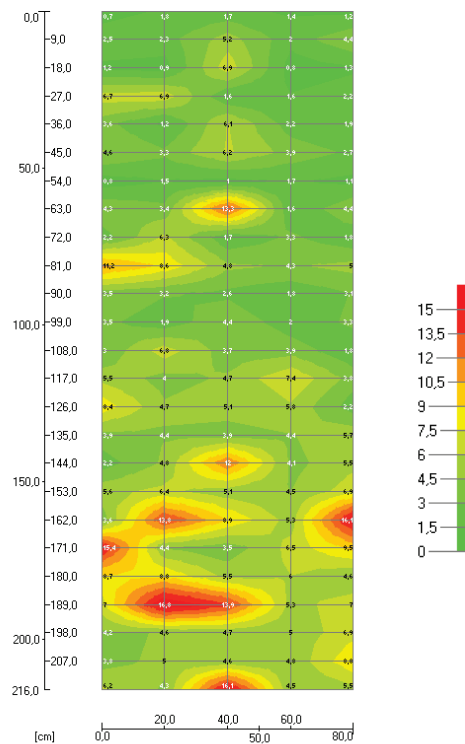
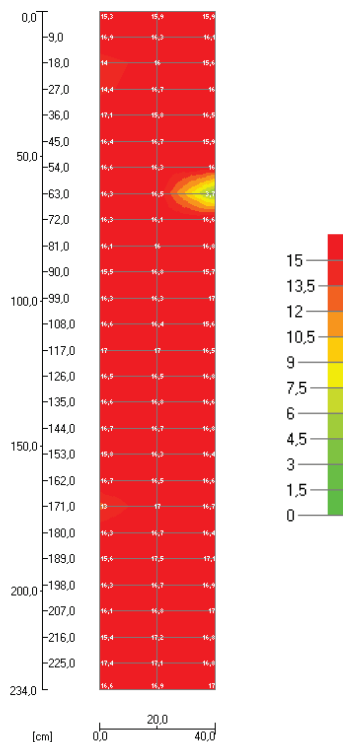


Abbildung 54: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 2 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts)

Die Falschfarbenbilder in Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die Feuchteverteilungen, aufgenommen in einem Raster von 20x9 cm. In allen Grafiken ist eine vertikale Schichtung erkennbar, wobei die Feuchtegehalte der Mauerziegel in der Tiefe der Wand höher sind als an der Bauteiloberfläche. Der Bauteil unter dem Stiegenhaus nahe dem Lichthof weist eine stark erhöhte Feuchtebelastung auf. Es wurden Materialfeuchten im Bereich der Sättigungfeuchte festgestellt. Dieses Problem tritt vermehrt bei Lichthöfen auf, da hier im Originalbestand des Gebäudes das Regenwasser ungehindert in den Boden des Lichthofs eindringen konnte und so zu einer lokalen Durchfeuchtung des Kellermauerwerks führte.

Messfeld 3: Mauer unter dem Stiegenhaus bzw. gegen erdberührt unter einem Lichthof

Feuchtegehalt in der Tiefe bis 30 cm



Feuchtegehalt an der Oberfläche bis 5 cm Tiefe

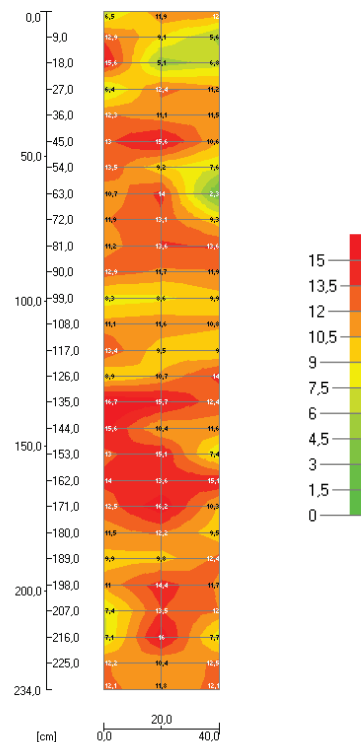


Abbildung 55: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 3 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts)

Zusammenfassend kann die Rasterfeuchtemessung als zerstörungsfreie und schnell durchführbare Methode zur Bestimmung der Materialfeuchte bezeichnet werden. Sie eignet sich besonders für qualitative Vergleiche unterschiedlich durchfeuchteter Bauteile in einem Gebäude, aber auch zur quantitativen Bestimmung der Materialfeuchte. Für diesen Fall müssen die im Gerät hinterlegten Materialparameter genau überprüft und gegebenenfalls geändert bzw. kalibriert werden.

5.3. Monitoring

5.3.1. Klimamessungen in nicht sanierten Bestandskellern

Wie bereits anhand der Simulationen des unterschiedlichen Luftwechsels in Abschnitt 5.1 sowie im Sanierungsbauteilkatalog [ZEL 17] beschrieben, ist das Raumklima unsanierter Kellerbereiche in der Regel stark vom Außenklima abhängig. Je nach Durchströmung der Kellerräume gleicht sich die Raumlufttemperatur der Außentemperatur an, wobei die Speichermassen des Kellers eine Phasenverschiebung zwischen den Aufwärm- und Abkühlzeiträumen hervorrufen. Dies führt zu der Problematik, dass die Raumluftfeuchte infolge kalter Bauteile stark ansteigen kann und somit vor allem im Frühjahr eine Befeuchtung des Kellers bzw. der Bauteiloberflächen stattfinden kann. Die folgende Abbildung 56 zeigt die Verläufe der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in einem nicht sanierten Gründerzeitkeller sowie das zugehörige Außenklima. Die Messdauer betrug circa 1,5 Jahre. Es ist erkennbar, dass die Kellerlufttemperatur (blaue Kurve) während der kalten Jahreszeit massiv abnimmt und während der Sommermonate nur knapp den Taupunkt der Außenluft überschreitet.

Vermutlich liegen die Bauteiltemperaturen während der Sommermonate deutlich unter der Raumlufttemperatur, wodurch das Risiko für Tauwasser- oder Schimmelpilzbildung stark erhöht ist. Leider wurden in dieser Messreihe keine Oberflächentemperaturen zum Nachweis der Taupunktunterschreitung erhoben.

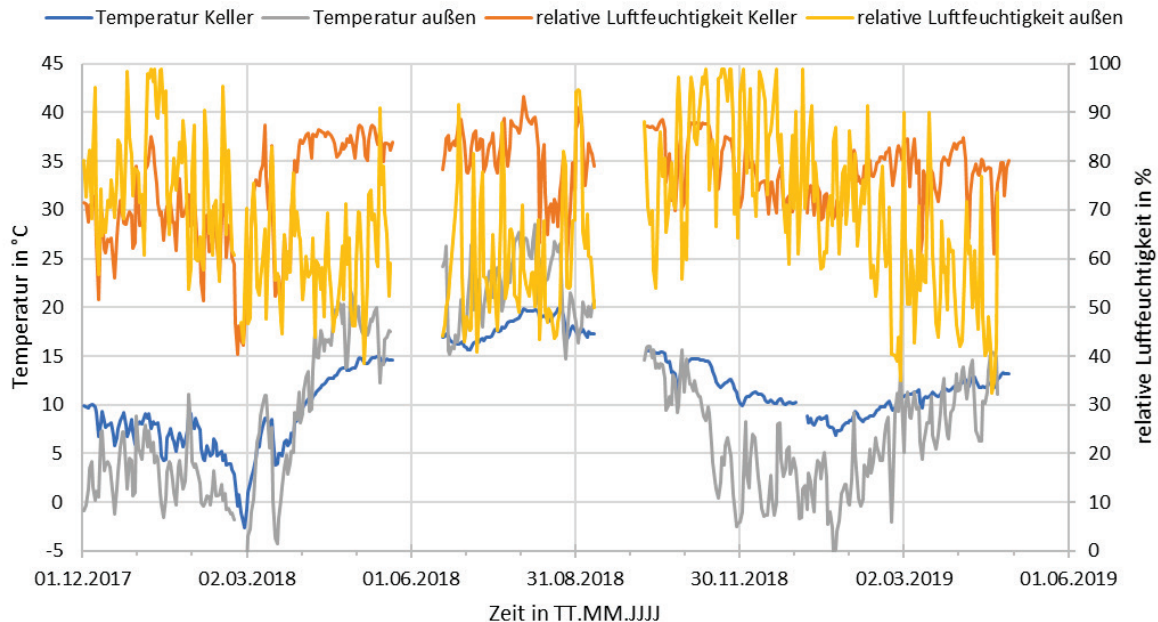


Abbildung 56: Klimaverhältnisse (Temperatur in blau und grau sowie relative Luftfeuchtigkeit in gelb und orange) in einem nicht sanierten Keller eines Gründerzeithauses bei unkontrollierter Durchlüftung sowie das Außenklima als Referenz

5.3.2. Raumklimamessungen in Souterrain-/Gartenwohnungen

Um die Feuchteproblematik in Kellerbereichen besser erfassen und dokumentieren zu können und um den Zusammenhang zwischen dem Nutzerverhalten, der Raumlüftung sowie auftretender Feuchteprobleme analysieren zu können, wurden in verschiedenen Wohnungen in mehreren Gebäuden Raumklimamessungen durchgeführt. Die ausgewählten Objekte sind anonymisiert dargestellt, wie bereits in Abschnitt 4.3.1 genauer erklärt. Alle untersuchten Wohnungen verfügen über eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung. Außerdem werden die Lüftungsanlagen über eine vorgeschaltete Feuchteüberwachung, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, geregelt. Diese Regelung hat zur Folge, dass bei schwülwarmem Sommerwetter einerseits kein zusätzlicher Feuchteintrag von außen in die Raumluft erfolgt, andererseits aber auch kein hygienischer Luftwechsel gesichert ist.

Das Raumklima wird in der Regel durch die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit beschrieben. Daraus lässt sich die absolute Luftfeuchtigkeit berechnen. Durch den Vergleich mit dem Feuchtegehalt der Außenluft kann der Feuchteüberschuss infolge Feuchteproduktion (Kochen, Duschen, Wäschewaschen etc.) im Raum ermittelt werden. Diese Einteilung des Raumklimas in Luftfeuchteklassen ist in der ÖNORM EN ISO 13788 beschrieben. Die folgende Abbildung 57 zeigt, dass bis auf zwei Objekte alle untersuchten Wohnungen in die Luftfeuchteklasse 2 fallen und somit einer typischen Wohnungsnutzung nach ÖNORM B 8110-2 entsprechen.

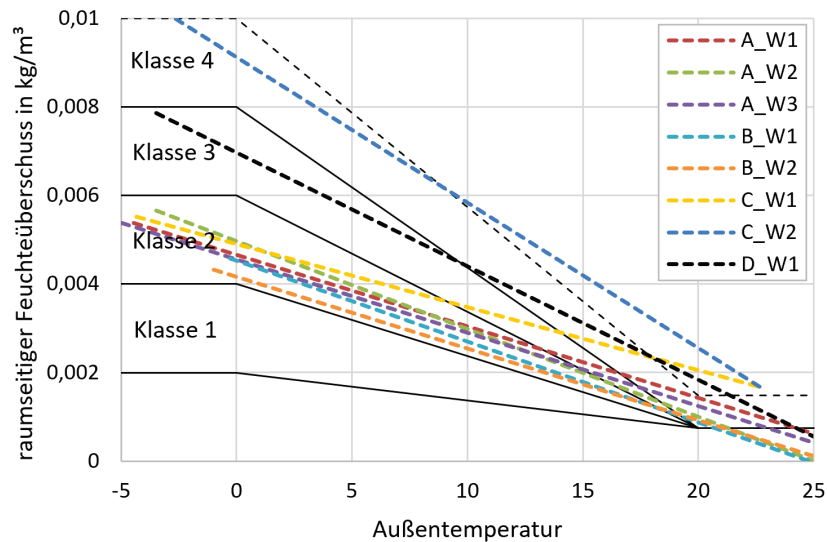


Abbildung 57: Einteilung der Raumklimadaten aller Messobjekte in die Luftfeuchteklassen gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) dargestellt; es ist zu erkennen, dass bis auf zwei abweichende Objekte alle untersuchten Wohnungen in die Luftfeuchtekategorie 2 fallen und somit einer typischen Wohnungsnutzung entsprechen.

Eine weitere Beurteilung des Raumklimas erfolgt über das Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur. Die folgende Grafik in Abbildung 58 zeigt, dass bei allen untersuchten Objekten die Raumlufttemperatur über das gesamte Jahr annähernd konstant ist. Dies kann auf die großen Speichermassen in den Souterrain-/Gartenwohnungen zurückgeführt werden. Während bei den untersuchten Wohnungen in den Gebäuden A bis C die Raumlufttemperatur im Sommer zumindest geringfügig höher ist als im Winter, zeigen die Messdaten der Wohnung C_W1 einen genau gegenteiligen Trend. In diesem Objekt liegen die Tagesmittelwerte der Raumlufttemperatur im Sommer bei ca. 22 °C.

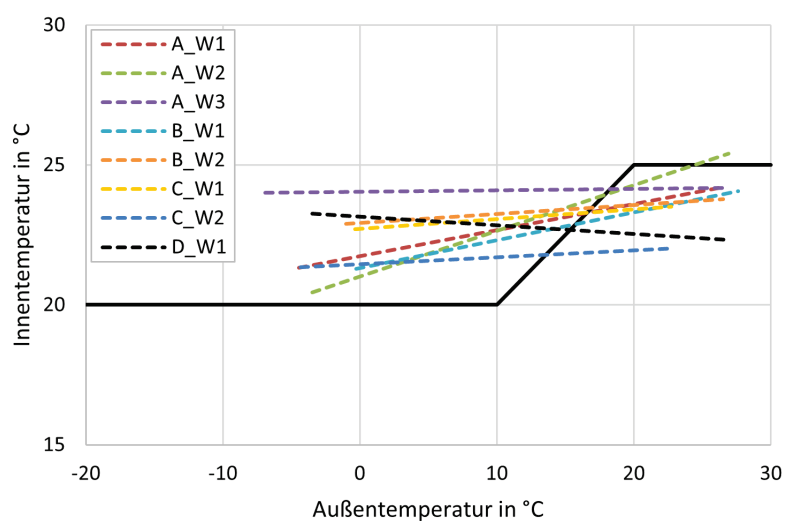


Abbildung 58: Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur aller Messobjekte gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) dargestellt; es ist zu erkennen, dass die Raumlufttemperatur in allen untersuchten Wohnungen über das gesamte Jahr annähernd konstant ist;

Analog dem Verhältnis der Lufttemperaturen zwischen innen und außen kann auch das Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und relativer Raumluftfeuchtigkeit dargestellt werden. Die Grafik in Abbildung 59 zeigt, dass die Messdaten der Wohnung C_W2 deutlich über dem Normbereich liegen, während die Messdaten aller anderen Wohnungen zur kalten Jahreszeit geringfügig unter und in den Sommermonaten im oder geringfügig über dem Normbereich sind.

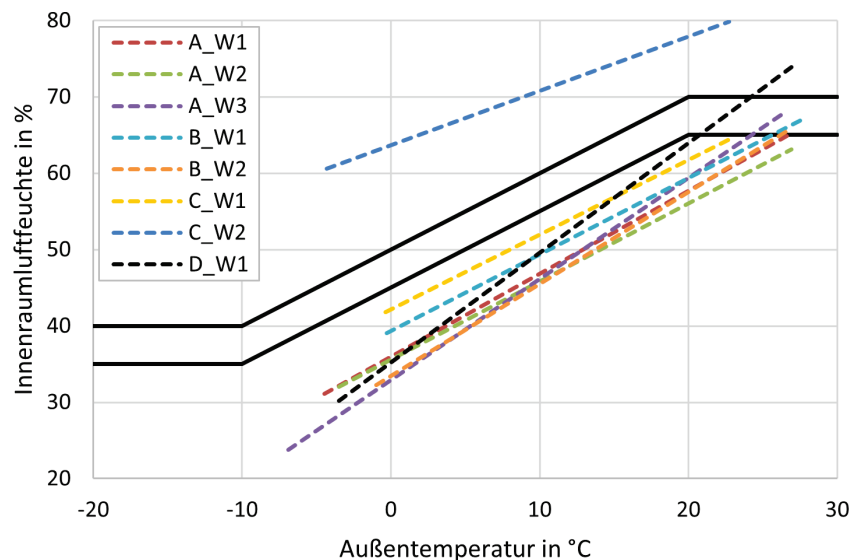


Abbildung 59: Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und relativer Innenraumluftfeuchte aller Messobjekte gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) dargestellt; es ist zu erkennen, dass die relative Raumluftfeuchte mit Ausnahme einer Wohneinheit in allen untersuchten Wohnungen im nicht kritischen Bereich liegt;

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Raumklima in sechs von acht untersuchten Wohnungen einer typischen Wohnungsnutzung entspricht und keine erhöhten Feuchtelasten auftreten. Die gemessenen Raumklimata liegen in der Luftfeuchtekategorie 2. Zwei der acht Wohnungen lieferten jedoch Messdaten in den Luftfeuchtekategorien 3 und 4. Diese beiden Objekte weisen eine erhöhte Innenraumluftfeuchte auf. Vor allem während der Sommermonate liegt das Raumklima bei allen untersuchten Wohnungen nahe am kritischen Feuchtebereich. Außerdem fällt auf, dass die beiden genannten Wohnungen vor allem im Sommer eine relativ geringe Raumtemperatur aufweisen und den vorgegebenen Bereich gemäß ÖNORM EN ISO 13788 deutlich unterschreiten. Da die Innenraumluftfeuchte stark durch die Raumlufttemperatur beeinflusst wird, ist in diesen beiden Objekten von einem erhöhten Risiko für Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen auszugehen.

Vergleicht man die Messergebnisse mit den baulichen Gegebenheiten der untersuchten Objekte, zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Einordnung der Raumklimata in die Luftfeuchtekategorien und dem Ausmaß der erdberührten Bauteile eines Objekts. Die Wohnungen C_W2 und D_W1 verfügen über eine deutlich größere Fläche erdberührter Bauteile, weil sie als „Vollkeller“ ausgeführt sind und nur hofseitig mit Fenstern bzw. einer gegen Außenluft orientierten Wand ausgestattet sind. Die anderen sechs untersuchten Wohnungen sind als „Halbkeller“ ausgeführt. Die erdberührten Bauteile reichen bei diesen Objekten bis maximal 180 cm unter das Niveau wobei straßenseitig Oberlichtfenster angeordnet sind. Dadurch verfügen diese Wohnungen einerseits über eine geringere Speichermasse und andererseits über eine geringere Feuchtebelastung aus erdberührten Bauteilen.

Alle detaillierten Messergebnisse der einzelnen Wohnungen in Form von Punktwolken der Tagesmittelwerte sind im Anhang unter Abschnitt 9.4 zusammengestellt. An dieser Stelle sind auch nutzerspezifische Unterschiede in der Verteilung der Punktwolken erkennbar, wie beispielsweise das Bestimmtheitsmaß der Regression. Auf diese speziellen Auswertungen und deren Einflüsse wird jedoch in diesem Bericht nicht näher eingegangen.

Beurteilung des Schimmelrisikos

Um das Schimmelrisiko in den Wohnungen einschätzen zu können, ist die Kenntnis der relativen Feuchte und der Temperatur an den Bauteiloberflächen erforderlich. Als kritischer Bereich wurde wie bei der Analyse des Schimmelrisikos in der Simulation (siehe Abschnitt 5.7.3) die Unterkante der erdberührten Wand identifiziert. Für die Oberfläche dieses Bauteils werden am Fußboden-Wand-Anschluss die Temperatur und die relative Luftfeuchte ermittelt.

Bekannt sind aus dem Monitoring zunächst Temperatur und Feuchte der Raumluft. Aufgrund hygrothermischer Übergangswiderstände zwischen Raumluft und Bauteil ergibt sich jedoch ein davon abweichender Wert an der Bauteiloberfläche. Es wurde eine passende Simulationsvariante identifiziert und angenommen, dass die reale Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Bauteiloberfläche mit jener in der entsprechenden Simulation weitgehend übereinstimmt. Bei der gewählten Simulationsvariante handelt es sich um die Variante mit einer Soll-Innentemperatur von 22°C und einer maximalen Luftwechselrate von 0,6/h. Es wurde jene Simulationsvariante gewählt, bei der mit einem erhöhten Übergangswiderstand von 0,5 m²K/W gerechnet wird, um das Schimmelrisiko einzuschätzen.

Darüber hinaus wird angenommen, dass der Dampfdruck an der Bauteiloberfläche gleich groß ist wie in der Raumluft. Der hygrische Übergangswiderstand wird also vernachlässigt. Diese Annahme führt zu einer erhöhten resultierenden Feuchte am Bauteil. Daher ist diese Annahme im Kontext der Schimmelrisikoanalyse als pessimistisch zu bezeichnen. Mit diesen Annahmen lässt sich in weiterer Folge die relative Feuchte an der Bauteiloberfläche berechnen.

Wie in Abschnitt 5.7.3 beschrieben, kommt es bei der Variante mit einer Soll-Innentemperatur von 22°C und einer maximalen Luftwechselrate von 0,4/h nicht zu nennenswertem Schimmelwachstum. Das Schimmelrisiko, das sich für die meisten Wohnungen ergibt, ist sogar noch geringer, da die Feuchtwerte dort noch deutlich niedriger sind. Diesbezüglich bildet nur die Wohnung C_W2 eine Ausnahme. Diese Wohnung wird weiter unten gesondert betrachtet. Eine statistische Auswertung der Feuchtwerte ist in Abbildung 60 zu sehen.

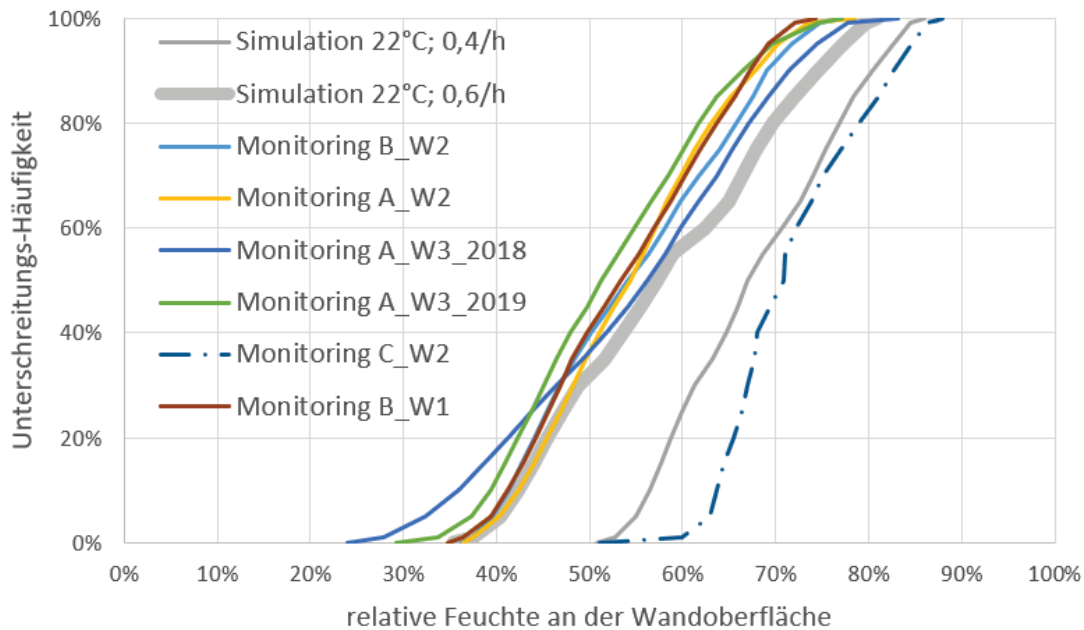


Abbildung 60: Verteilungsfunktionen der relativen Feuchtwerte an der Bauteiloberfläche für Simulationsvarianten und Monitoringdaten. Auf der y-Achse ist aufgetragen, in wieviel Prozent der Fälle eine gewisse Feuchte unterschritten wird. Es ist zu sehen, dass die Simulationsvariante 22°C; 0,4/h einen deutlich höheren Feuchtwert aufweist als die meisten Wohnungen. Die einzige Ausnahme bildet diesbezüglich Wohnung C_W2.

In Abbildung 60 ist auch zu sehen, dass sich in der Hauptvariante der Simulation (Simulation 22°C; 0,6/h) ähnliche Feuchtehäufigkeiten ergeben, wie sie auch im Monitoring gemessen wurden. Das weist darauf hin, dass die Simulation in dieser Hinsicht die Realität mit einer gewissen Genauigkeit abbildet. Die Simulation überschätzt jedoch vor allem bei den hohen Feuchtwerten deren Häufigkeit. Dadurch ist die Simulation gut geeignet, eine pessimistische Vorhersage über Feuchtwerte zu machen und kann daher als Planungswerkzeug eingesetzt werden. Dies ist eine relevante Erkenntnis in Bezug auf die entsprechende Forschungsfrage.

Bei der Analyse des Schimmelrisikos der Wohnung C_W2 ergibt sich, dass auf Flächen von mittlerer Sensitivität wie Putzflächen (Klasse „medium resistant“) kein nennenswertes Schimmelwachstum zu erwarten ist. Jedoch kann es auf Möbelstücken (Klasse „sensitive“) zu Schimmelwachstum kommen. Es sind hierbei maximale Mould-Index-Werte zwischen 1 und 2 zu erwarten. Dies sind Werte, bei denen unter dem Mikroskop Schimmelwachstum erkennbar ist [OJA 11]. Der Jahresverlauf des zu erwartenden Mould-Index ist in Abbildung 61 zu sehen.

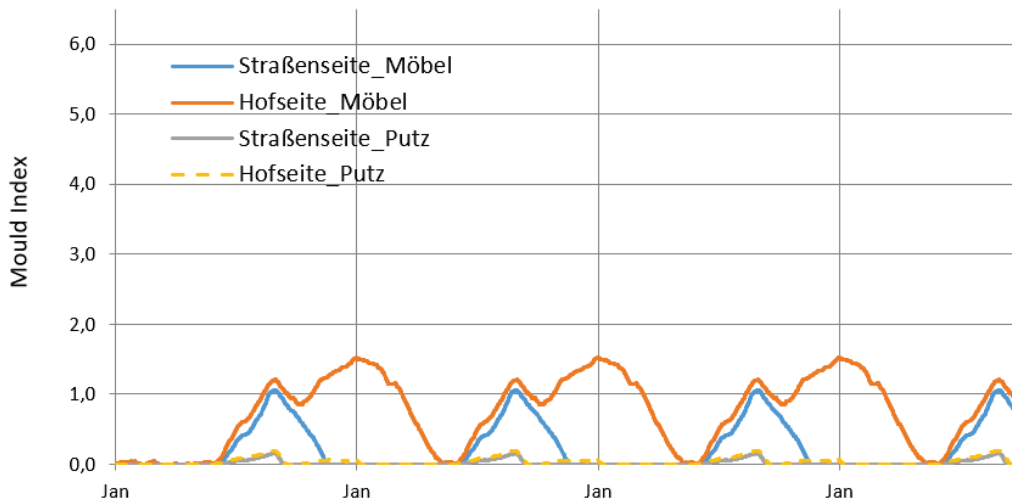


Abbildung 61: Verlauf des Mould-Index nach [OJA 11] in Wohnung C_W2. Es ist zu sehen, dass es kein Schimmelrisiko auf dem Putz gibt. Auf sensitiven Flächen kommt es zu mikroskopischem Schimmelwachstum.

Insgesamt zeigt sich, dass aus der Untersuchung für die meisten Wohnungen kein Schimmelrisiko abgeleitet werden kann. Bei der Wohnung C_W2 ist aufgrund erhöhter Feuchtwerte eine gesonderte Betrachtung erforderlich. Selbst dort erweist sich jedoch, dass nur auf wandberührten Möbelstücken unter dem Mikroskop sichtbares Schimmelwachstum zu erwarten ist. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass das Feuchtmanagement durch eine feuchtegesteuerte Lüftungsstrategie möglich ist und unterstreicht damit die Relevanz für die entsprechende eingangs formulierte Forschungsfrage.

5.3.3. Bauteilmessungen zur Beurteilung des Schadensrisikos

Am Gebäude B wurden in den Souterrain-/Gartenwohnungen Bauteilmessungen im Bereich des Fußbodenaufbaus durchgeführt. Das Ziel der Messungen war, das Risiko eines Feuchteschadens mittels Langzeitmessung zu beurteilen. Dazu wurden Temperatur-/Luftfeuchte-Kombisensoren in verschiedenen Bauteilschichten des Fußbodens eingebaut. Bei den einzelnen Messpositionen wurde zwischen ungestörten Fußbodenbereichen in Raummitte und den Fußboden-/Wandanschlüssen im Bereich der Hoffassade bzw. der erdanliegenden straßenseitigen Außenwand unterschieden. Die Fotos in Abbildung 62 zeigen die abgeflämmte Fundamentplatte. Die vollflächige Abdichtung des Stahlbetons verhindert das Aufsteigen von Feuchtigkeit in den darüberliegenden Fußbodenaufbau. An den Fußboden-/Wandanschlüssen wurde ein Hochzug von ungefähr 25 cm ausgeführt. Dies entspricht annähernd der Höhe des Fußbodenaufbaus bis zur fertigen Fußbodenoberkante. Der durchgängig umlaufende Hochzug der Abdichtung an sämtlichen Wandabschnitten der Souterrain-/Gartenwohnungen verhindert ein seitliches Eindringen von Feuchtigkeit in den Fußbodenaufbau. Die Dauerhaftigkeit dieser Ausführung wird mittels Langzeitmonitoring überprüft, indem einzelne Messstellen (FB2, FB7 und FB10) direkt an den kritischen Wandanschlussbereichen positioniert wurden. Eine zusätzliche Messstelle (FB4) wurde am Fensteranschluss zum Terrassenaustritt hergestellt.



Abbildung 62: Situation am Beginn des Innenausbaus der Souterrain-/Gartenwohnungen im Gebäude B; es ist die abgeflämmte (3-lagige Bitumenabdichtung) Bodenplatte sowie der umlaufende Hochzug der Abdichtung zu sehen; im rechten Foto sind Durchdringungen des Hochzugs dokumentiert;

Im rechten Foto der Abbildung 62 sind die Elektroleitungen zu erkennen, die den Abdichtungshochzug durchdringen, um die Leitungsführungen vom Wandbereich in den Fußbodenbereich zu verbinden. Diese Fehlstellen in der Abdichtung wurden zwar mit Bitumenanstrich übermalt, dennoch stellen sie ein beträchtliches Risiko für das Eindringen von Mauerfeuchte in den Fußbodenaufbau dar.

Abbildung 63 zeigt die Grundrisse der Wohnungsausbaupläne der Wohnungen 1 und 2 des Gebäudes B mit den Sensorpositionen. Die Messpositionen im ungestörten Fußbodenaufbau in Raummitte sind blau, jene an den Boden-/Wandanschlüssen orange markiert. In Abbildung 64 ist ein Querschnitt durch die Wohnung 1 dargestellt. Dabei ist ein Ausschnitt des Fußbodenaufbaus vergrößert herausgezeichnet, die Sensorpositionen sind im vertikalen Schichtaufbau markiert. Die Nummerierung der Sensorpositionen erfolgte über einen zweistelligen Zifferncode. Die erste Ziffer der Bezeichnung gibt die Lage im Raum (Grundrissplan) wieder. Die zweite Ziffer legt die jeweilige Position in einer Bauteilschicht fest. Drei Positionen wurden untersucht: Sensor FBx3 liegt direkt auf der Bitumenabdichtung der Stahlbetonplatte, somit unter der gebundenen Ausgleichsschüttung und im kältesten Bereich des Aufbaus. Die gebundene Schüttung besteht aus 10 bis 12 cm Styroporbeton (Produkt Isofloor) und stellt eine Innendämmung der Fußbodenkonstruktion gegen die Fundamentplatte dar. Der Sensor FBx2 liegt an der Schichtgrenze der gebundenen Ausgleichsschüttung zur darüberliegenden PE-Folie. Diese ist als Dampfbremse an der warmen Seite der Dämmung verklebt ausgeführt. Auf der Folie befinden sich eine 30 mm dicke Trittschalldämmung aus Mineralwolle, eine Trennlage zur Befestigung der Fußbodenheizungsrohre sowie ein 6,5 cm dicker Estrich. Der oberste Sensor FBx1 wurde an der Estrichoberfläche ca. 1 cm tief versenkt, um den darüberliegenden Parkett eben verkleben zu können.

Eine auszugsweise Fotodokumentation der Einbausituation sowie eine detaillierte Darstellung des Schichtaufbaus des untersuchten Fußbodens ist Abbildung 65 bzw. der Auflistung darüber zu entnehmen.

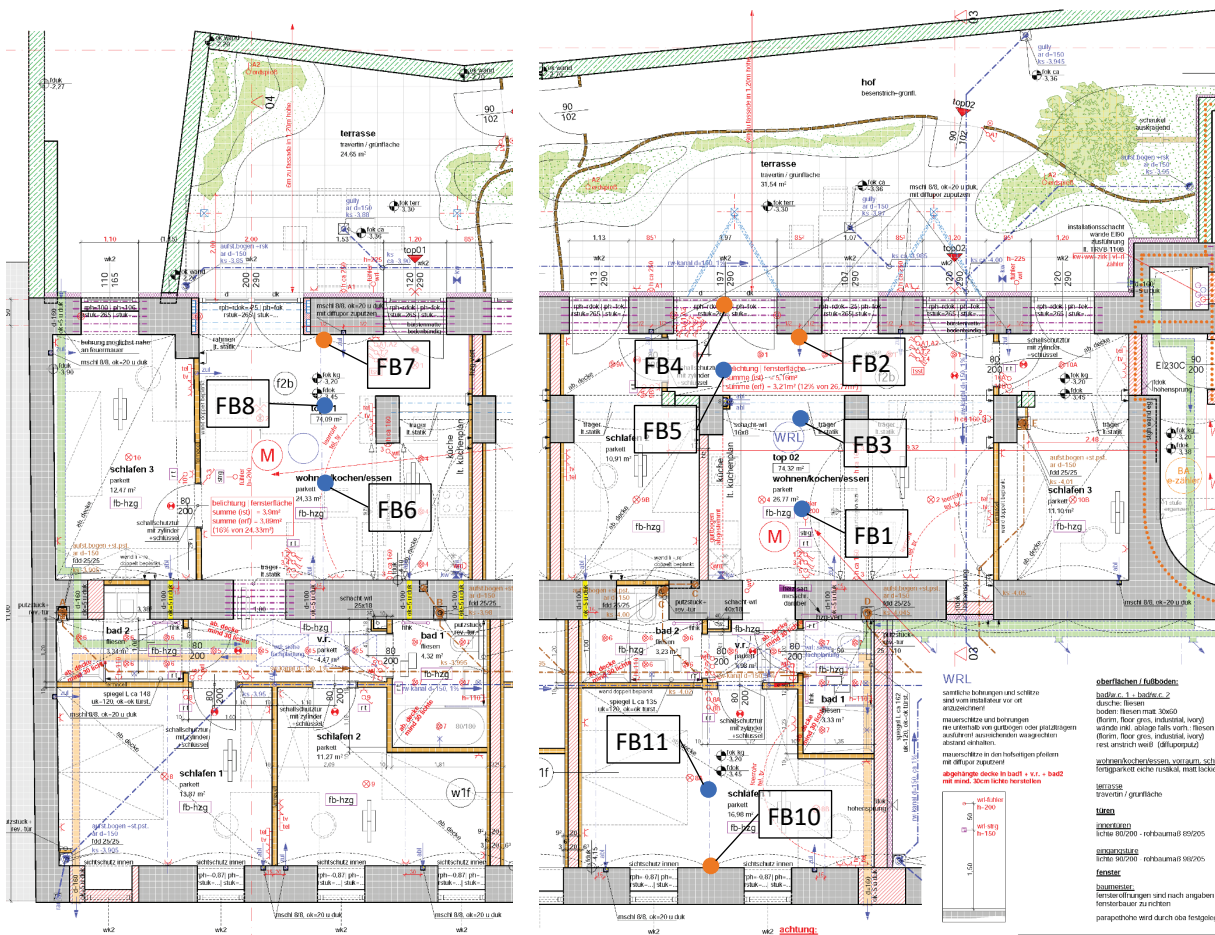


Abbildung 63: Grundriss der Souterrain-/Gartenwohnungen im Gebäude B mit Markierung der Messpositionen im Fußbodenaufbau; blau markierte Positionen befinden sich im Raum und stellen einen nahezu eindimensionalen Schichtaufbau dar; orange markierte Positionen befinden sich an Boden-Wand-Anschlüssen bzw. an einem Boden-Fensterstock-Anschluss und stellen einen mehrdimensionalen Bauteilaufbau dar;

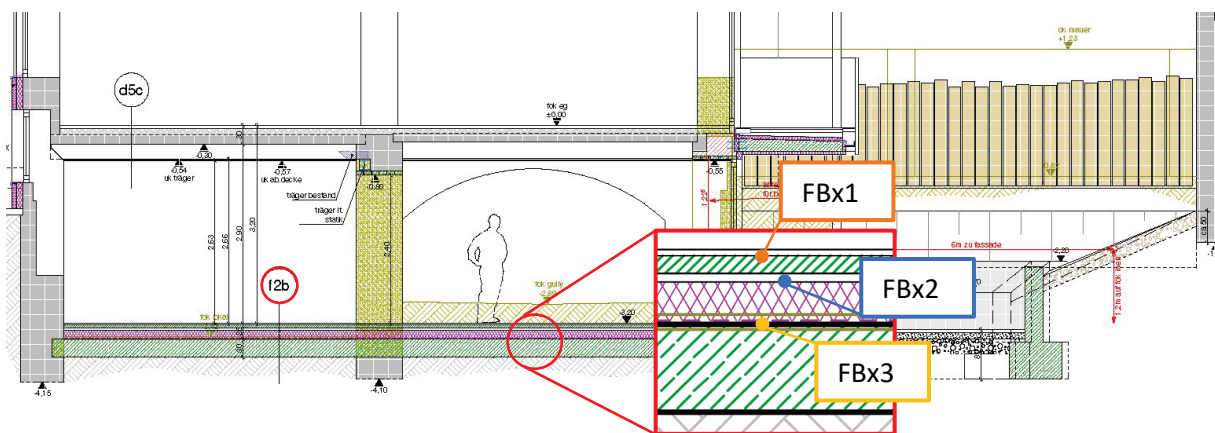


Abbildung 64: Querschnitt durch eine Souterrain-/Gartenwohnung im Gebäude B mit Markierung des Fußbodenaufbaus f2b und ungefährender Markierung der Sensorpositionen

Schichten des Fußbodenaufbaus f2b gemäß obiger Abbildung von oben nach unten:

- 1,5 cm Parkett geklebt
- Sensor FBx1
- 6,5 cm Zementestrich mit Fußbodenheizung; Oberfläche unbehandelt (Sensoren FB1 bis FB5); alle restlichen Positionen: Oberfläche mit Renogrund (PU Abdichtung) 2-lagig abgedichtet
- Roth Flipfix Tacker Systemplatte
- 3 cm Isover TDPT 30
- PE Folie (Dampfbremse ohne Angabe des s_d -Werts)
- Sensor FBx2
- 12 cm Isofloor gebundene Schüttung
- Sensor FBx3
- 1 cm Bitumenabdichtung
- 30 cm Stahlbetonplatte

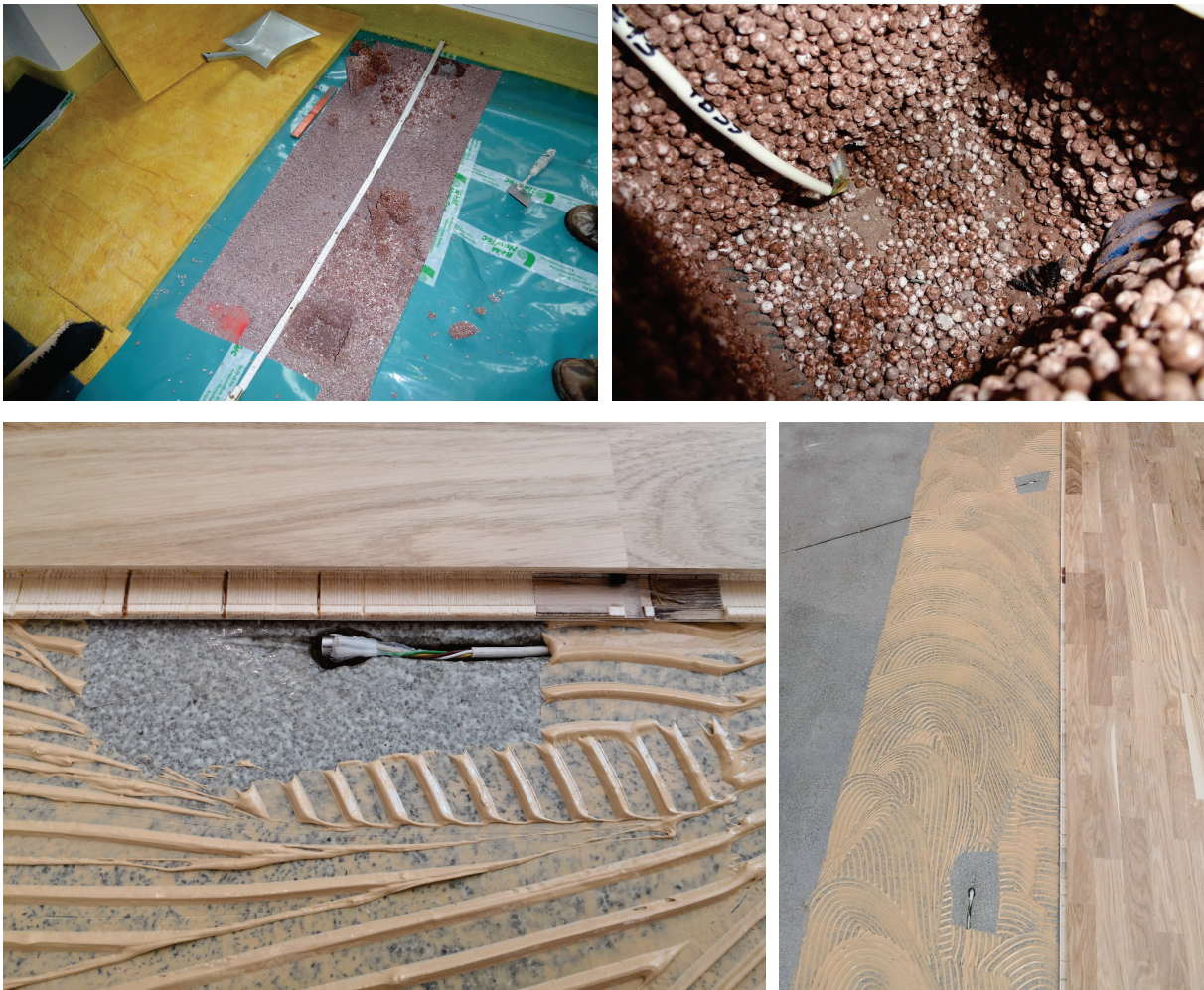


Abbildung 65: Montage der T/reILF-Kombisensoren im Fußbodenaufbau; gebundene Schüttung mit Folie und Trittschalldämmung (oben links); Lage des Sensors unter der gebundenen Schüttung (oben rechts); Lage des Sensors zwischen Estrich und geklebtem Parkett (unten links und rechts);

Es konnten Ergebnisse aus drei Jahren Datenaufzeichnung ausgewertet werden. Die folgenden Grafiken in Abbildung 66 bis Abbildung 68 zeigen die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit in den einzelnen Fußbodenschichten. Je Diagramm sind die Ergebnisse einer Schicht (FBx1 bis FBx3) farblich dargestellt, bei den Sensorpositionen in Raummitte blau und am Wandanschluss orange. Die einzelnen Messquerschnitte werden dabei durch Farbschattierungen unterschieden.

In der obersten Bauteilschicht zwischen Estrich und geklebtem Parkett (Sensorpositionen FBx1) können anhand des Verlaufs der relativen Luftfeuchtigkeit (siehe Abbildung 66) zwei Bereiche unterschieden werden:

Die blau schattierten Kurven, die alle Messpositionen im ungestörten Aufbau in Raummitte darstellen, bewegen sich durchwegs im nicht kritischen Bereich unter 70% relativer Luftfeuchte. Es ist ein jahreszeitlicher Sinusgang feststellbar, der über die Messdauer von drei Jahren eine leicht abklingende Tendenz aufweist. Dies deutet auf ein – wenngleich sehr langsames – Austrocknen der Konstruktion hin. Die Schwankungen im Kurvenverlauf sind auf die Veränderungen des Raumklimas zurückzuführen. Möglicherweise sind auch die Auswirkungen der Fußbodenheizung in gepufferter Form hier abgebildet. Ein Unterschied zwischen den Bereichen mit/ohne Abdichtungsanstrich des Estrichs ist nicht oder nur in einem sehr geringen Ausmaß feststellbar. Im ersten Jahr der Messung liegt die relative Luftfeuchte an den Messpositionen ohne Estrichabdichtung geringfügig höher als an den Messstellen mit Estrichabdichtung.

Die orange schattierten Kurven, welche die Messpositionen am Boden-Wand-Anschluss darstellen, bewegen sich mit einer Ausnahme (der Messstelle am Fensteranschluss) im überkritischen Bereich von größer 70% relativer Luftfeuchtigkeit. Dies kann einerseits mit der in Abbildung 62 beschriebenen Problematik des Abdichtungshochzugs und andererseits mit dem damit verbundenen Temperaturunterschied zwischen kaltem Wandbauteil und gedämmtem Fußboden begründet werden. Da der Parkett bzw. die Sesselleiste direkt an die Wand anschließen, besteht in diesem Bereich ein erhöhtes Risiko für Schimmelpilzbildung. Ablagerungen von Staub oder anderen organischen Substanzen können dieses Risiko zusätzlich erhöhen. Die Messungen zeigen weiters, dass das Schadensrisiko von der Jahreszeit unabhängig ist. Im vorliegenden Fall ist nicht erkennbar, dass das Schimmelrisiko während der Sommermonate infolge zu geringer Bauteiltemperaturen erhöht wäre.

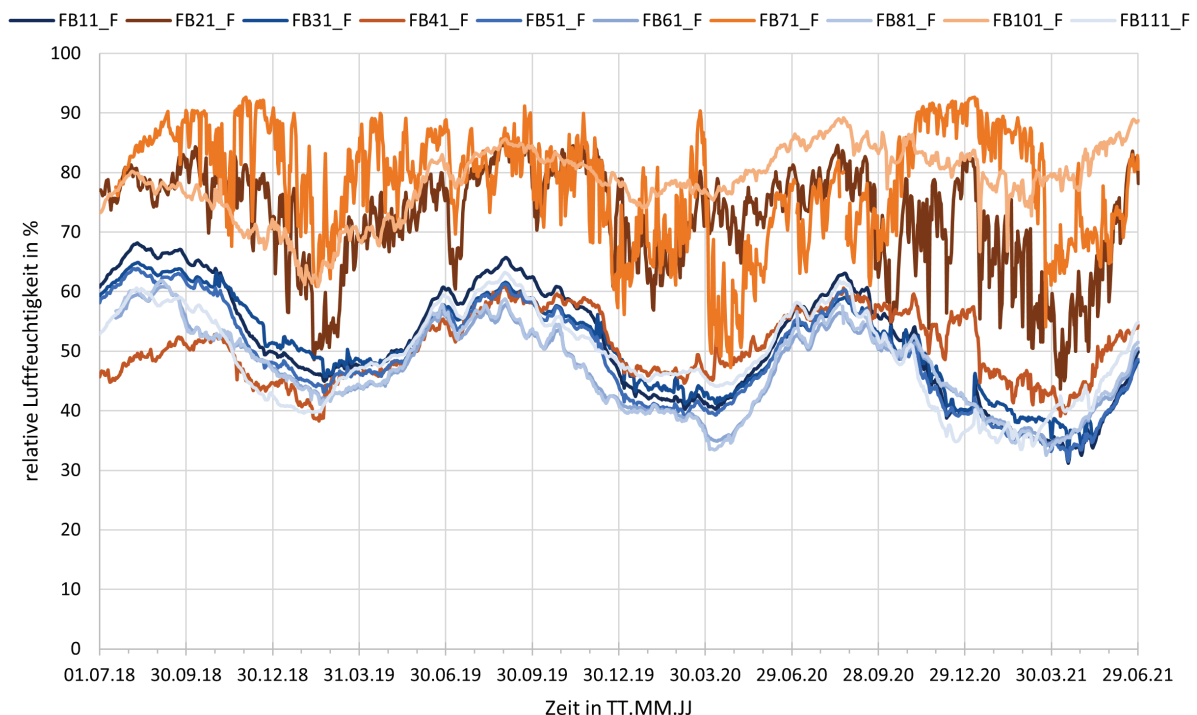


Abbildung 66: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den oberen Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt;

An den mittleren Sensorpositionen (FBx2) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Sensoren FBx1 in Bezug auf die Lage in Raummitte oder am Boden-Wand-Anschluss, wenngleich der Unterschied nicht so eindeutig ausfällt. Gleichzeitig sind die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit allgemein deutlich höher als in der obersten Bauteilschicht. Vor allem die Messstellen FB22 und FB72, die beide an der hofseitigen Außenwand liegen, neigen zur Bildung von Kondensat und bergen daher ein hohes Risiko für Schimmelpilzbildung. Am Fensteranschluss ist das Schadensrisiko deutlich geringer.

Bei den Messstellen am ungestörten eindimensionalen Fußbodenaufbau (blaue Kurven) zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Wohnungen. Während die Messpositionen in Top 2 (FB12, FB32, FB52 und FB112) über die gesamte Messdauer einen wiederkehrenden Sinusverlauf mit Minimumwerten von unter 30% relativer Luftfeuchtigkeit zeigen, sind die Messwerte aus Top 1 deutlich höher und zeigen keine jahreszeitlichen Schwankungen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Fußbodenheizung in Top 1 zu Beginn der Messungen nicht in Betrieb war und erst im zweiten Winter leicht, im dritten Winter der Messaufzeichnungen höher eingestellt war. Im Gegensatz dazu war die Fußbodenheizung in Top 2 in jeder Winterperiode aktiviert und lieferte einen Beitrag zur Austrocknung des Fußbodenaufbaus. Die Temperaturverläufe (beispielhaft dargestellt für die Sensorpositionen FBx1 in Abbildung 69) bestätigen dies.

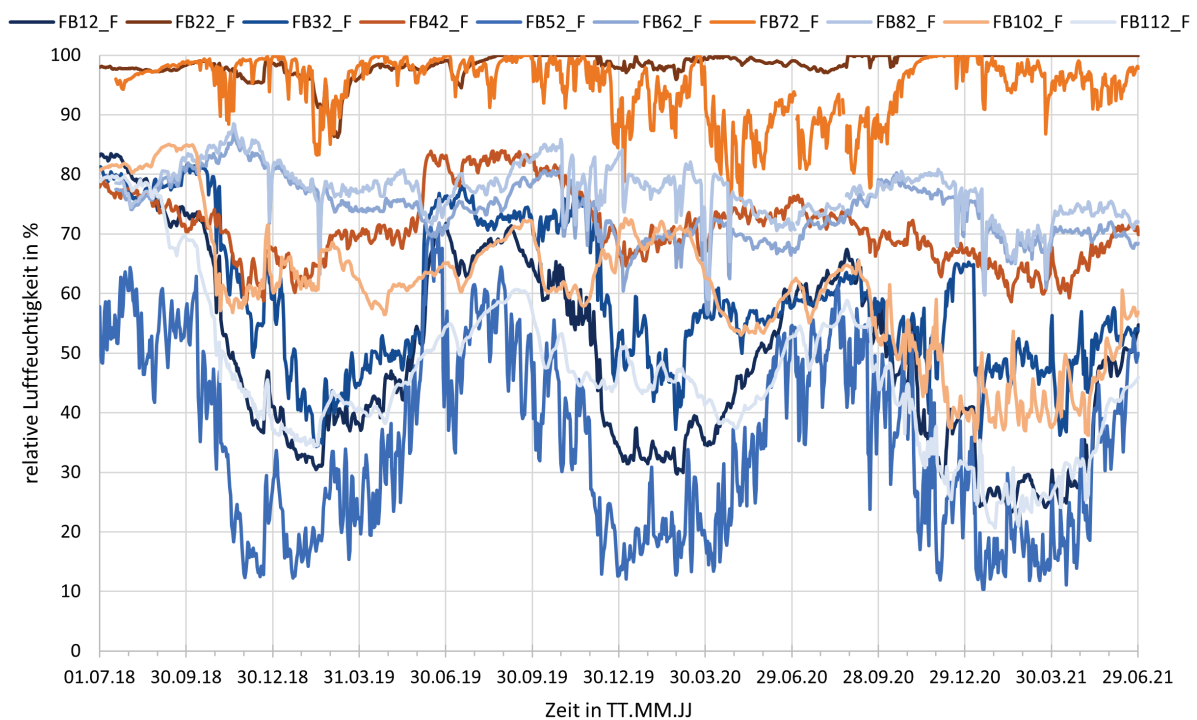


Abbildung 67: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den mittleren Messpositionen unter der Dampfbremse im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt;

An den untersten Messpositionen im Fußbodenaufbau (FBx3) stellen sich durchwegs feuchtekritische Werte ein (siehe Abbildung 68). Es ist jedoch eine Tendenz zum Austrocknen der Konstruktion zu erkennen. Die Messpositionen im Boden-Wand-Anschluss zeigen von Beginn der Aufzeichnungen an ein hohes Schadensrisiko, wobei auch hier eine Tendenz zum Austrocknen der Konstruktion erkennbar ist. Nur die Sensorposition FB73, die an der hofseitigen Außenwand liegt, zeigt über die gesamte Messdauer eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % an, was auf eine hohe Mauerfeuchtigkeit

hindeutet. Auch in der untersten Schicht des Fußbodenaufbaus an der Oberfläche der Bitumenabdichtung ist der Einfluss der Fußbodenheizung erkennbar. Wie bereits bei den Auswertungen der mittleren Sensorlage erwähnt, ist auch in dieser Bauteilschicht der Unterschied zwischen stark aufgedrehter Fußbodenheizung (Sensorpositionen FB13, FB33, FB53 und FB113) in Top 2 und weniger bis gar nicht genutzter Fußbodenheizung in Top 1 (Sensorpositionen FB63 und FB83) erkennbar.

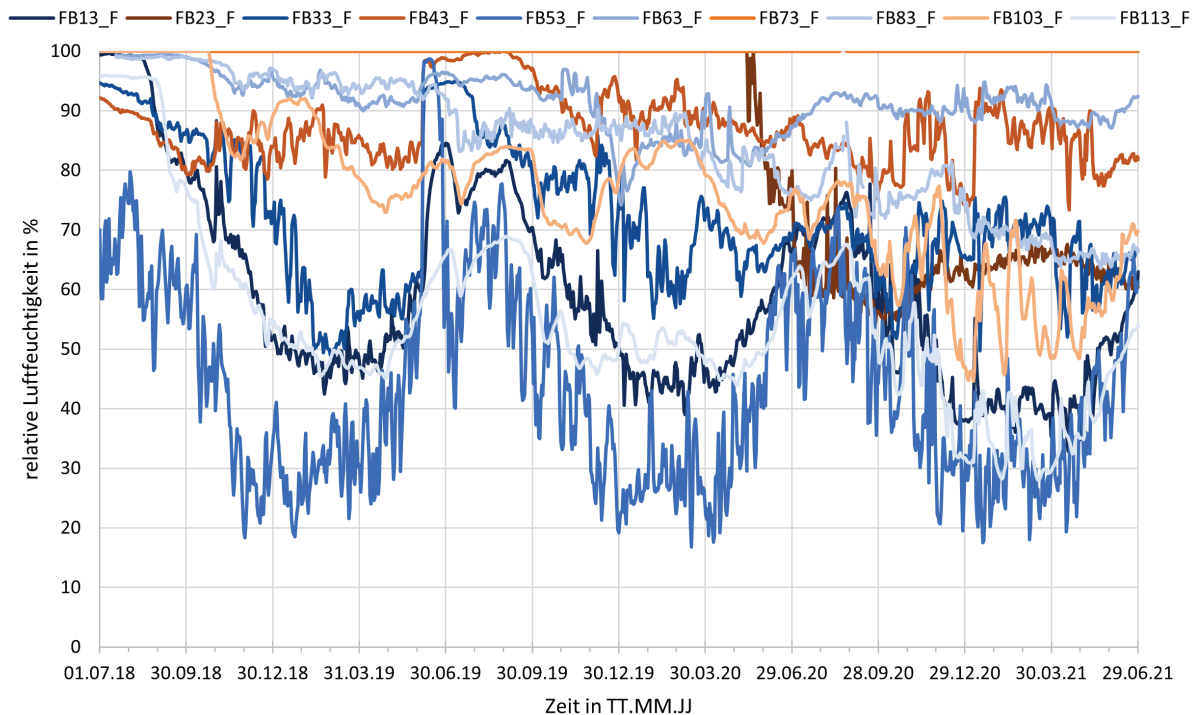


Abbildung 68: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den unteren Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt;

Wie oben erwähnt, sind die Unterschiede der Bauteiltemperaturen im Fußbodenaufbau der beiden untersuchten Wohnungen aufgrund der unterschiedlichen Nutzung der Fußbodenheizung deutlich erkennbar. In Wohnung 2 erreicht der Estrich bzw. der Parkettboden während der kalten Jahreszeit eine Temperatur von über 30°C. In Wohnung 1 beträgt die Temperatur in der obersten Fußbodenschicht im selben Messzeitraum (Winterperiode 2018/19) unter 20°C (siehe Messkurven in Abbildung 69).

In der dritten untersuchten Winterperiode (2020/21) sind die Temperaturen in der obersten Bodenschicht in beiden Wohnungen annähernd gleich. Ebenso sind an allen Sensorpositionen jene Zeiträume, in denen die Heizung abgesenkt wurde, klar erkennbar. Besonders gut zeigt sich diese Situation um die Weihnachtsfeiertage 2020.

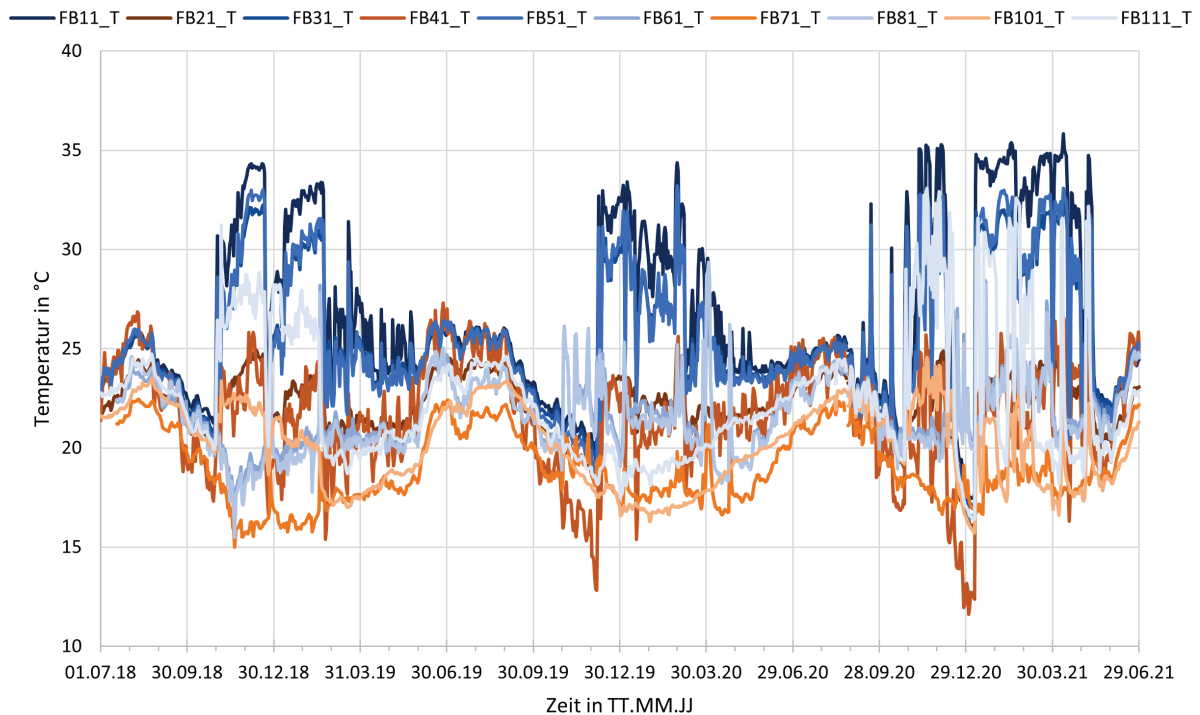


Abbildung 69: Verlauf der Temperatur über drei Jahre an den oberen Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt;

Wie in Abschnitt 4.3.1 ausgeführt, wurde auch am Gebäude A ein Bauteilmonitoring installiert. Auch bei diesem Objekt war das Ziel, Messdaten von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum zu erheben und auszuwerten. Aufgrund der hohen Mauer- bzw. Bauteilfeuchtigkeit entstanden wenige Wochen nach der Installation der Sensorik an mehreren Messstellen Schäden an der Elektronik. Es wurde zwar versucht, einzelne Sensoren aus dem Messverbund herauszunehmen, doch nach mehreren Monaten stellte sich heraus, dass fast die gesamte Sensorik ausgefallen war.

Auch wenn in diesem misslungenen Monitoring keine verwertbaren Messergebnisse entstanden, waren die Erkenntnisse vielschichtig:

- Untersuchungen mit Temperatur/relative Luftfeuchte-Kombisensoren erfolgen ausschließlich über die Messung der Klimazustände in einem definierten Luftraum. Bei Raumklimamessungen ist dies in der Regel die Raumluft, die den Sensor an einer bestimmten Stelle umgibt, meist unter einer geschützten Sensorverkleidung. Bei Bauteilmessungen in einer Materialschicht muss ein vordefinierter Hohlraum geschaffen werden, in dem der Sensor Platz findet. Dies kann bei massiven Materialien ein Bohrloch, bei Dämmstoffen eine Materialfuge oder eine Vertiefung sein. Das umgebende Material emittiert Feuchtigkeit an die Luft im Sensorgehäuse. Dadurch kann eine Porenluftfeuchtigkeit bzw. eine Lufttemperatur gemessen werden.
- Bei stark saugenden Materialien wie beispielsweise Ziegelmauerwerk, die in der Regel eine flache Sorptionsisotherme und eine geringe Ausgleichsfeuchte bei Raumklima aufweisen, findet der Großteil der Wasserspeicherung im überhygroskopischen Bereich über 95 % relativer Luftfeuchtigkeit statt. Demzufolge ist bei durchfeuchtetem Mauerwerk, wie es meist in Souterrainbereichen vorkommt, eine Messung der relativen Porenluftfeuchtigkeit nicht

zielführend. Die Sensorik zeigt durchwegs einen Wert von 100 % relativer Luftfeuchtigkeit an, wobei nicht feststellbar ist, ob das Material einen Wassergehalt von 10 oder von 100 Volumsprozent aufweist. Dieser Zusammenhang wird durch die Materialfunktionen im Anhang in Abbildung 119 verdeutlicht.

- Da das fehlgeschlagene Monitoring am Objekt A bereits zwei Jahre vor der Installation des Monitorings im Objekt B erfolgte, konnten die oben beschriebenen Erkenntnisse in den Folgeprojekten umgesetzt werden.
- Alternativ zu den Messungen mit Sensorik wurden am Objekt A Bohrmehlproben entnommen und mittels Darmmethode ausgewertet. Dieses Verfahren liefert zwar genaue Messdaten, diese sind jedoch nur auf den Probenentnahmezeitpunkt bezogen. Eine zerstörungsfreie Messdatenaufzeichnung über einen längeren Zeitraum ist bei durchfeuchtetem Mauerwerk nicht möglich.

5.3.4. Einfluss der Lüftungssteuerung „Intelligent Automatic“ (IA)

Im Abschnitt 5.3.2 wurde bereits das Raumklima bei einer Lüftungssteuerung mit Feuchteregelung nach dem „EIN/AUS“ Prinzip beschrieben und ausgewertet. Diese Art der Lüftungssteuerung wurde in den letzten fünf Jahren bei Projekten von Gassner & Partner standardmäßig eingesetzt. Die Nachteile dieser Lüftungssteuerung und die Problematik des unzureichenden hygienischen Luftwechsels bei Wohnungsnutzung sind in Abschnitt 4.5 angeführt.

Im Folgenden sind die Messergebnisse des Prototypentests der intelligenten automatischen Lüftungssteuerung (IA) zusammengefasst. Die Steuerung erfolgte nach dem Entscheidungsbaum, der acht verschiedene „Was wäre, wenn“-Fälle unterscheidet. Dabei werden sowohl ein hygienischer Mindestluftwechsel als auch eine feuchteabhängige Regelung berücksichtigt. Die Lüftungsstrategie der IA mit allen Lüftungsszenarien ist im Abschnitt 5.6 beschrieben. Da die theoretische Entwicklung des Regelalgorithmus, die anschließende Programmierung sowie die Anbindung an eine bestehende Lüftungsanlage sehr zeitaufwendig waren, konnten in der Projektlaufzeit von „space4free“ nur kurze Zeiträume mit Messdaten der IA generiert werden. Aufgrund der Komplexität des Regelalgorithmus und der damit verbundenen nutzungsbedingten Parameter müssen Lüftungssteuerungen mit IA einem dauerhaften technischen Monitoring unterzogen werden.

Abbildung 70 zeigt den Zeitraum mit auswertbaren Messdaten der Lüftungssteuerung mit IA. Parallel zur IA konnten am Lüftungsgerät auch die standardmäßig voreingestellten Betriebsprogramme aktiviert werden. Leider wurden die Einstellungen durch die Wohnungsnutzer des Öfteren verstellt, weil entweder das Lüftungsgerät im Volllastbetrieb zu laut war oder weil die Nutzer die Urlaubsschaltung aktivierten. In der Grafik sind horizontale rote Linien dargestellt, die die angesprochenen unterschiedlichen Betriebszustände markieren. Der „Mode 3“ entspricht der IA. Der „Mode 4“ entspricht dem Zustand, wenn die absolute Außenluftfeuchte größer ist als die absolute Innenluftfeuchte. Die horizontalen gelben Linien bzw. Datenpunkte stellen den aktuellen Luftvolumenstrom in Prozent der Maximalleistung des Lüftungsgeräts dar. Dieser liegt in der Regel bei 70 % der Volllast und wird nur durch zwei mögliche Ereignisse unterbrochen:

- Wenn die CO₂-Konzentration über 1000 ppm steigt, wird der Luftvolumenstrom auf 100 % angehoben.

- Wenn die absolute Luftfeuchtigkeit der Außenluft größer ist als jene der Raumluft, wird die Lüftung auf einen hygienischen Mindestluftwechsel reduziert. Im Fall eines geringen CO₂-Werts der Raumluft und einer geringen relativen Raumluftfeuchte wird die Lüftungsanlage abgeschaltet.

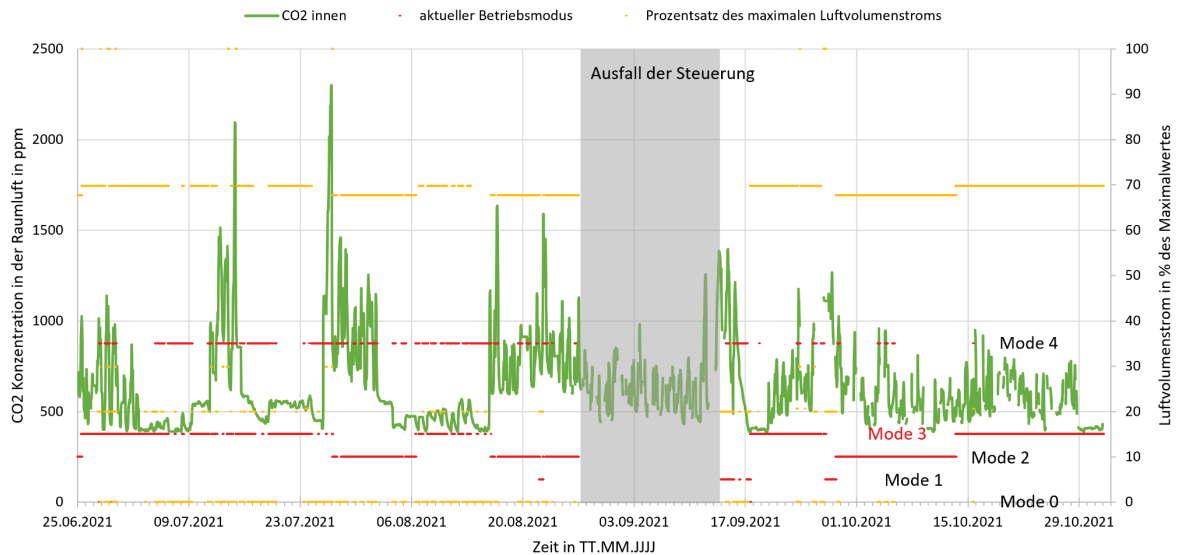


Abbildung 70: Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie CO₂-Konzentration in Stundenmittelwerten in der Testwohnung; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; unbrauchbare Messdaten während eines Ausfalls der Steuerung sind grau hinterlegt;

Die folgende Abbildung 71 zeigt analog zur Abbildung 70 den Verlauf der absoluten Luftfeuchte der Raumluft und der Außenluft. Außerdem wird der aktuelle Betriebsmodus der Lüftungsanlage und der aktuelle Volumenstrom dargestellt.

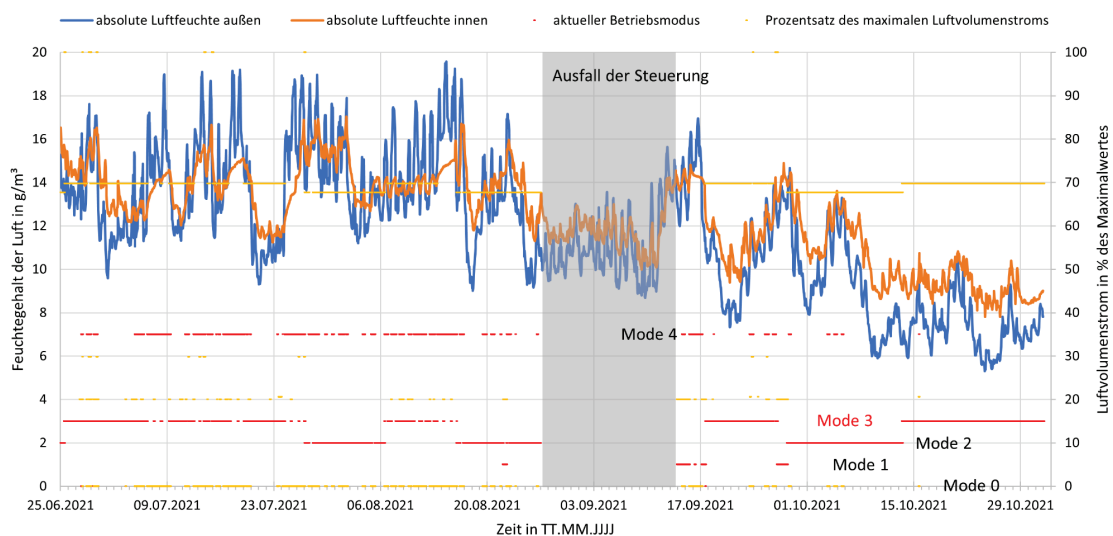


Abbildung 71: Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie absolute Luftfeuchte in Stundenmittelwerten in der Testwohnung und im Außenbereich; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; unbrauchbare Messdaten während eines Ausfalls der Steuerung sind grau hinterlegt;

Um die Auswirkungen des nutzerbedingten Raumklimas auf die Lüftungssteuerung genauer analysieren zu können, werden zwei Zeitabschnitte aus den Messdaten ausgewählt. Abbildung 72 zeigt Zeitabschnitte mit erhöhten CO₂-Werten, Abbildung 73 mit einer größeren absoluten Außen- als Raumlufffeuchte. Die Zeitabschnitte sind ident gewählt, wodurch ein direkter Vergleich der beiden Diagramme möglich wird. Die Kurven wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in zwei Diagramme aufgeteilt.

Es ist ersichtlich, dass im Zeitraum 1 (blaue elliptische Markierung in den beiden Diagrammen) der CO₂-Wert über 1000 ppm steigt, wodurch der Volumenstrom kurzzeitig auf 100 % gesetzt wird (gelbe Linie). Da gleichzeitig die absolute Außenluftfeuchte größer ist als die absolute Raumlufffeuchte, entscheidet die Lüftungssteuerung ein kurzzeitiges Abschalten der Anlage (Mode 4). In dieser Zeitspanne ist außerdem erkennbar, dass die Wohnungsnutzer die Lüftungsanlage aufgrund der hohen Geräuschentwicklung bei maximalem Luftwechsel kurzzeitig abgedreht haben (Mode 0). Im Zeitraum 2 (blaue elliptische Markierung in den beiden Diagrammen) steigt der CO₂-Wert deutlich über 1000 ppm mit Spitzenwerten von über 2000 ppm. Gleichzeitig ist das Außenklima über mehrere Tage feuchter als das Innenklima, wodurch ein Luftwechsel grundsätzlich nicht sinnvoll ist. Aufgrund der hohen CO₂-Werte gibt der Regelalgorithmus einen geringen Grundluftwechsel von 20-30 % der Lüftungsleistung vor.

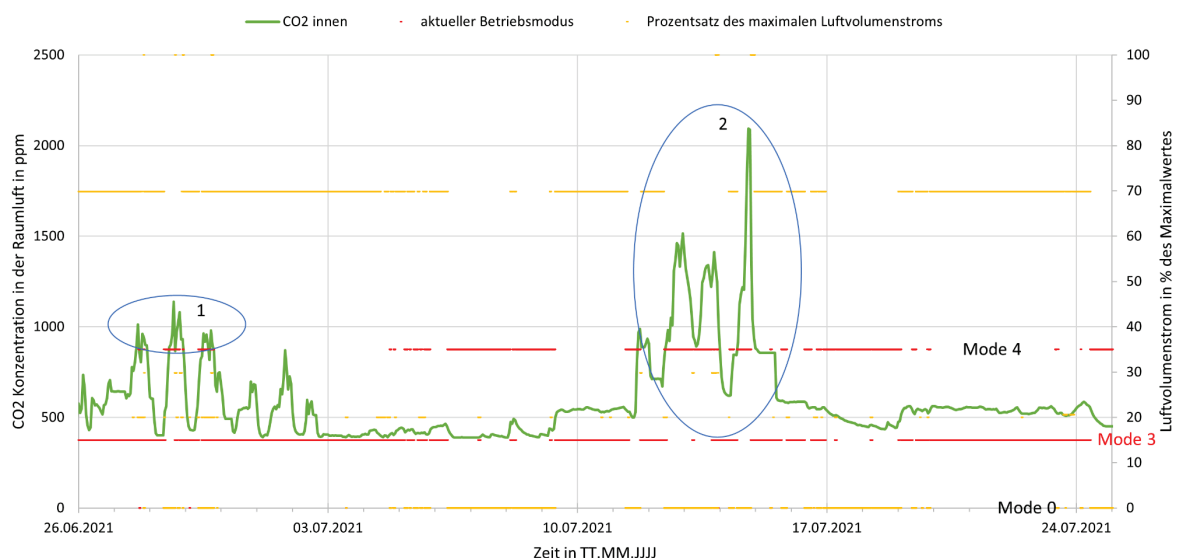


Abbildung 72: Ausschnitt aus den Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie CO₂-Konzentration in Stundenmittelwerten in der Testwohnung; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; es sind zwei Zeiträume dargestellt, in denen die CO₂-Konzentration 1000 ppm übersteigt und die Steuerung somit einen höheren Luftwechsel aktiviert;

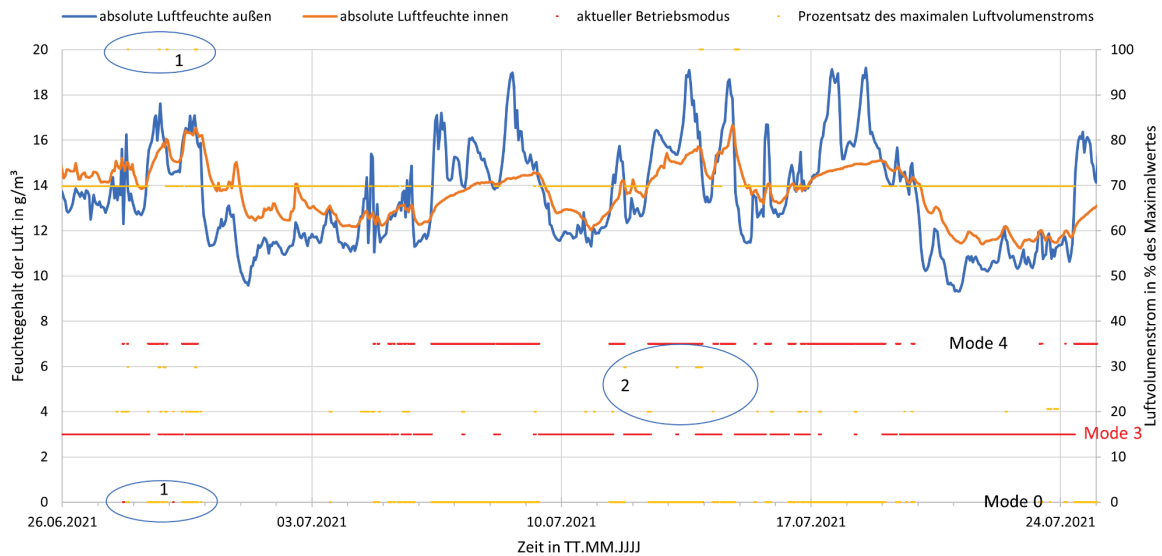


Abbildung 73: Ausschnitt aus den Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie absolute Luftfeuchte in Stundenmittelwerten in der Testwohnung und im Außenbereich; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; es sind Zeiträume dargestellt, in denen die absolute Außenluftfeuchte die absolute Raumluftfeuchte übersteigt und die Steuerung somit nur einen Grundluftwechsel aktiviert;

Im Zuge der Auswertung hat sich gezeigt, dass aufgrund der Komplexität der möglichen Klimakonstellationen umfangreichere Messdaten und längere Messzeiträume für eine genaue Evaluierung aller Regelungssituationen erforderlich sind.

5.4. Messung der Feuchteemissionen der Bauteile

Im August und September 2020 wurde eine Entfeuchtung in der Wohnung A_W1 durchgeführt. Dabei wurde ein elektrischer Entfeuchter eingesetzt, der täglich acht Stunden lang die Raumluft entfeuchtete. In den verbleibenden 16 Stunden wurde die Raumluft von den Umschließungsflächen (Wände, Boden und Decke) wieder befeuchtet. Da in diesem Zeitraum die Wohnung nicht genutzt oder belüftet wurde, kann die Befeuchtung der Raumluft auf Feuchteemissionen der Bauteile zurückgeführt werden. Dabei wird lediglich der Effekt des Feuchteausstauschs mit der Außenluft infolge von Infiltration vernachlässigt. Abbildung 74 zeigt den zeitlichen Verlauf der Entfeuchtung.

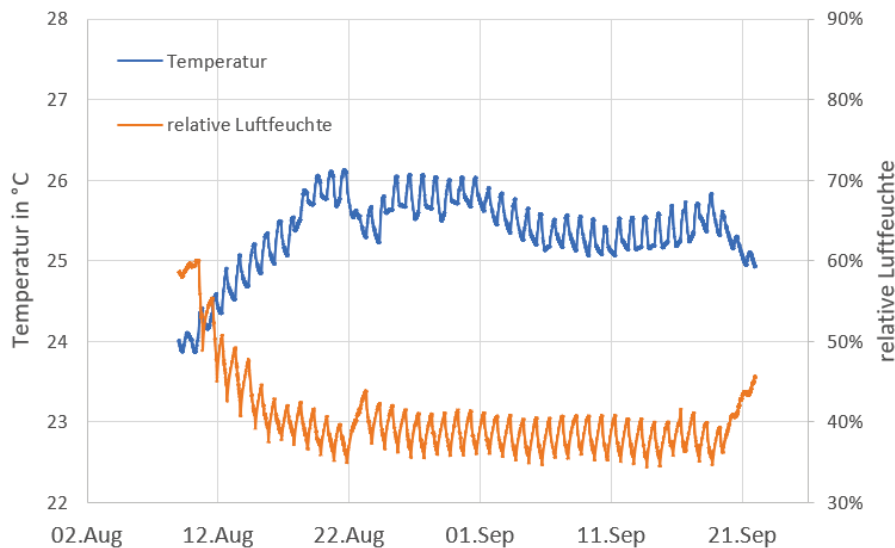


Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in der Testwohnung während der Entfeuchtung. Die Zacken des Intervallbetriebs des Entfeuchters sind deutlich zu erkennen.

Isoliert man in den dabei gewonnenen Daten die Zeiträume, in denen der Entfeuchter nicht in Betrieb war, können zu jedem Zeitpunkt die Befeuchtung der Raumluft durch die umschließenden Bauteile sowie der Dampfdruck berechnet werden. Es ist anzunehmen, dass bei trockenerer Luft die Bauteile mehr Feuchte abgeben als bei feuchterer Luft. Mit steigendem Dampfdruck sollte also der Feuchteintrag aus den Bauteilen sinken. Diese Annahme konnte bestätigt werden (siehe Abbildung 75).

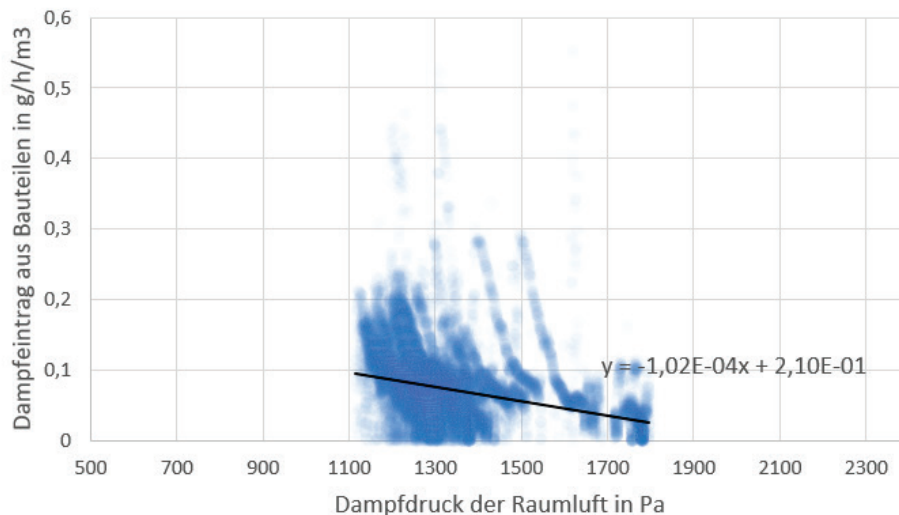


Abbildung 75: Monitoring – Dampfeintrag aus Bauteilen über dem Dampfdruck der Raumluft. Es ist zu erkennen, dass sich der Eintrag bei steigendem Dampfdruck verringert.

Vergleicht man diesen Feuchteintrag mit Ergebnissen aus den Sommermonaten der Simulation, so fällt auf, dass der Eintrag aus Bauteilen in der Messung weitaus geringer ausfällt als in der Simulation. Dies ist insofern überraschend, als in der Simulation ein Zustand untersucht wird, dem eine zehnjährige Nutzung vorausgeht. Dadurch sollte die Wand zumindest in den oberflächennahen Schichten bereits weitgehend getrocknet sein. Die Auswertung der Simulationsdaten ist in Abbildung 76 zu sehen.

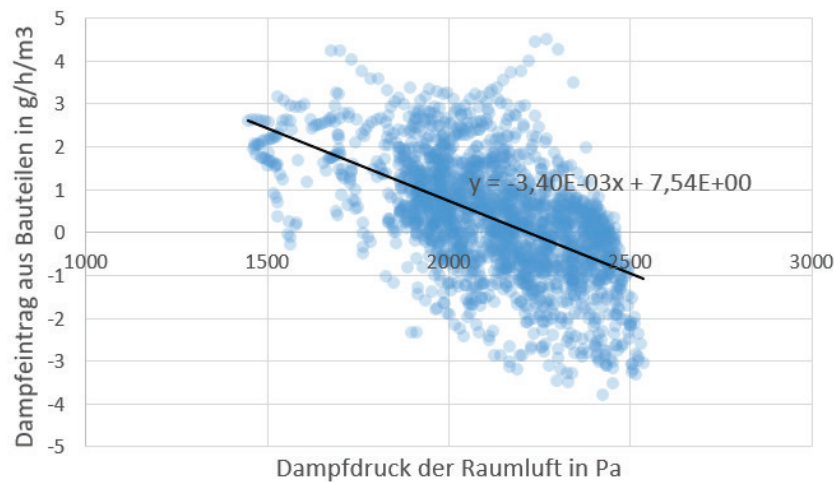


Abbildung 76: Simulation – Dampfeintrag aus Bauteilen über dem Dampfdruck der Raumluft (nur Sommermonate). Der Eintrag aus Bauteilen ist höher als im Monitoring.

Qualitativ zeigen Monitoring und Simulation das gleiche zu erwartende Verhalten: Der Feuchteintrag aus Bauteilen sinkt mit steigendem Dampfdruck der Raumluft. Quantitativ gibt es jedoch starke Unterschiede: Die Einträge in der Simulation sind in etwa zehnmal so hoch. Die Abweichung kann damit begründet werden, dass sich der in der Simulation als diffusionsoffen angenommene und daher nicht berücksichtigte Anstrich möglicherweise stark auf den Feuchteausaustausch zwischen Raumluft und Bauteil auswirkt. Es ist jedoch auch möglich, dass durch den Putz weniger Feuchte transportiert wird als in der Simulation angenommen. Ursache dafür könnte sein, dass ein in der Simulation nicht berücksichtigter Vorspritzmörtel verwendet wird, der den Feuchteausaustausch zwischen Mauerwerk und Putzschicht hemmt. Da die Simulation die Feuchteimmissionen durch die Bauteile überschätzt und trotzdem ein Raumklima entsteht, das kein Schimmelrisiko aufweist, ist die Schlussfolgerung zulässig, dass die Feuchteimmissionen aus den Bauteilen laut Monitoring nicht zu einem Schimmelrisiko führen.

5.5. Materialdatenbestimmung

5.5.1. Versuche zu Mauerwerk und Putz

Es wurden zehn Proben, bestehend aus einem Verbund aus Gründerzeitziegeln und Diffupor®-Verputz, vermessen. Mit den Proben wurden drei verschiedene Versuche durchgeführt.

Aufsaugversuch – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Die Proben wurden vom Hersteller Diffupor® fertig verputzt beige gestellt, siehe Abbildung 77. Für die Proben wurden originale Gründerzeitziegel aus einem Bestandsgebäude verwendet.



Abbildung 77: Vom Putzhersteller angefertigte Verbundproben vor dem Aufsaugversuch

Die Verbundproben wurden beim Aufsaug- bzw. beim Trocknungsversuch immer so im Wasser gelagert, dass die Aufstandsfläche die unverputzte Ziegelseite war. Somit lag diese unten und die Putzschicht oben. Das ist zwar bezüglich der realen Einbausituation in der Wand eine um 90° gedrehte Position, der entsprechende Fehler ist bei den geringen Abmessungen und den daher geringen Unterschieden bezüglich äußerer Einwirkungen wie Gravitation oder Strahlung vernachlässigbar.

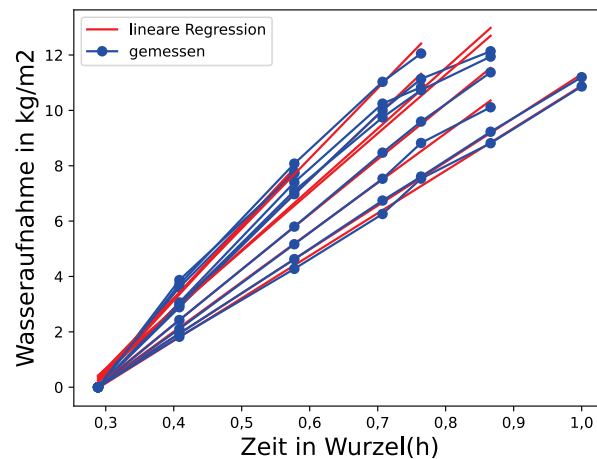


Abbildung 78: Übersichtsdigramm zur Streuung des Verlaufs der Wasseraufnahme der zehn Verbundproben im Aufsaugversuch bis zum Erreichen der Grenzfläche zwischen Ziegel und Putz. Dargestellt sind gemessene Kurven (blau) und Kurven, die aus den Messungen über lineare Regression ermittelt wurden (rot). Gemittelt über alle Proben resultiert ein mittlerer Wasseraufnahmekoeffizient von $21,41 \pm 3,95 \text{ kg/m}^2/\text{Wurzel(h)}$.

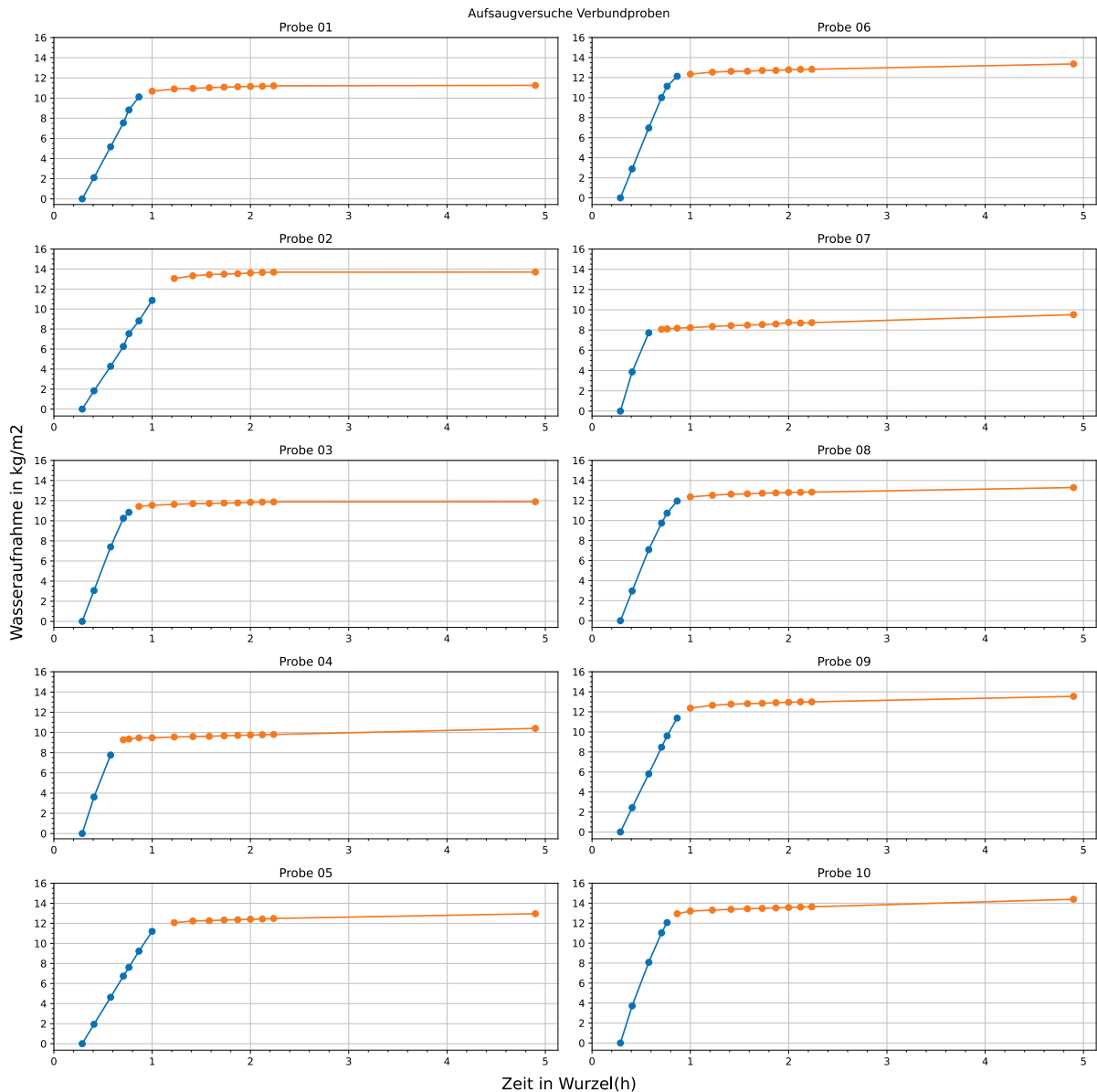


Abbildung 79: Verlauf der gemessenen flächenspezifischen Wasseraufnahme der zehn Verbundproben im Aufsugversuch. Erläuterungen zum Knick im Zeitverlauf (in der Lücke zwischen der blauen und orangenen Kurve) sind im entsprechenden Abschnitt der Methodik, Seite 44, enthalten.

In Abbildung 79 ist der im Methodikteil beschriebene Knick in der Verlaufskurven deutlich zu sehen. Grundsätzlich weisen auch reine Ziegelproben einen Knick im zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme auf, nämlich dann, wenn die Hauptfeuchtefront die obere Ziegelaußenoberfläche, also die Grenzfläche zwischen Probe und Außenluft, erreicht und Wasser nur mehr über Verdunstung abgegeben wird. In dem Fall der Verbundproben war dieser letztere Knick, der damit ein zweiter Knick in der Kurve wäre, aber nicht mehr zu beobachten, weil der Putz derart wenig saugfähig ist und die gewählte Verputzdicke zu groß war, als dass die Feuchtefront die obere Probenoberfläche erreichen hätte können – die Feuchtefront blieb nach Erreichen der Grenzfläche Ziegel-Putz somit "im Putz hängen" (maximale Steighöhe im Putz ca. 0,5 cm, siehe Abbildung 80).



Abbildung 80: Foto der Verbundprobe nach dem Aufsaugversuch. Erkennbar ist die geringe Steighöhe der Feuchtefront in der Putzschichte. Der Putz hat eine – verglichen mit dem Ziegel – geringe Saugkraft. Foto: Sascha Zeiler.

Bestimmung der freien Wassersättigung

Nach dem Aufsaugversuch wurden die Ziegel-Putz-Verbundproben 144 Stunden (sechs Tage) in einem Wasserbad gelagert. Die Proben waren über den gesamten Zeitraum völlig mit Wasser überdeckt, siehe Abbildung 81. Die Grafiken in Abbildung 82 zeigen die Verläufe der Wassermassen aller Verbundproben. Es wurden vier Wiegevorgänge durchgeführt, bevor der Versuch am sechsten Tag der Wasserlagerung abgebrochen wurde.

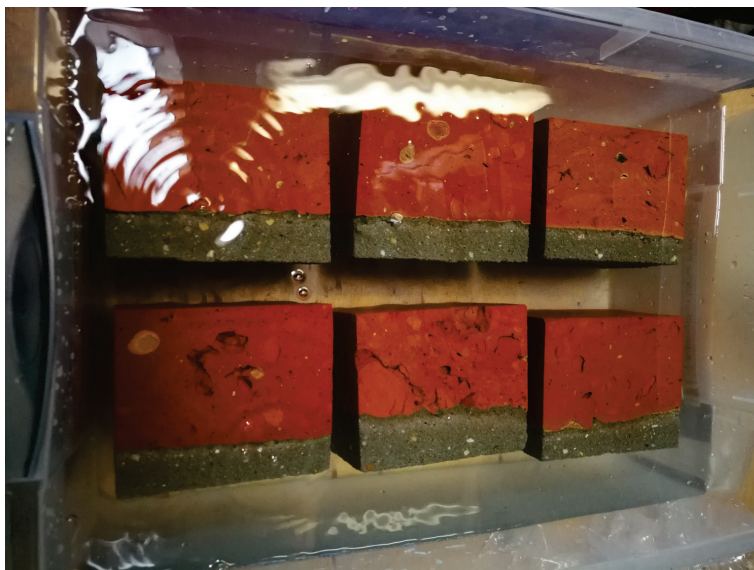


Abbildung 81: Drucklos im Wasserbad gelagerte Verbundproben

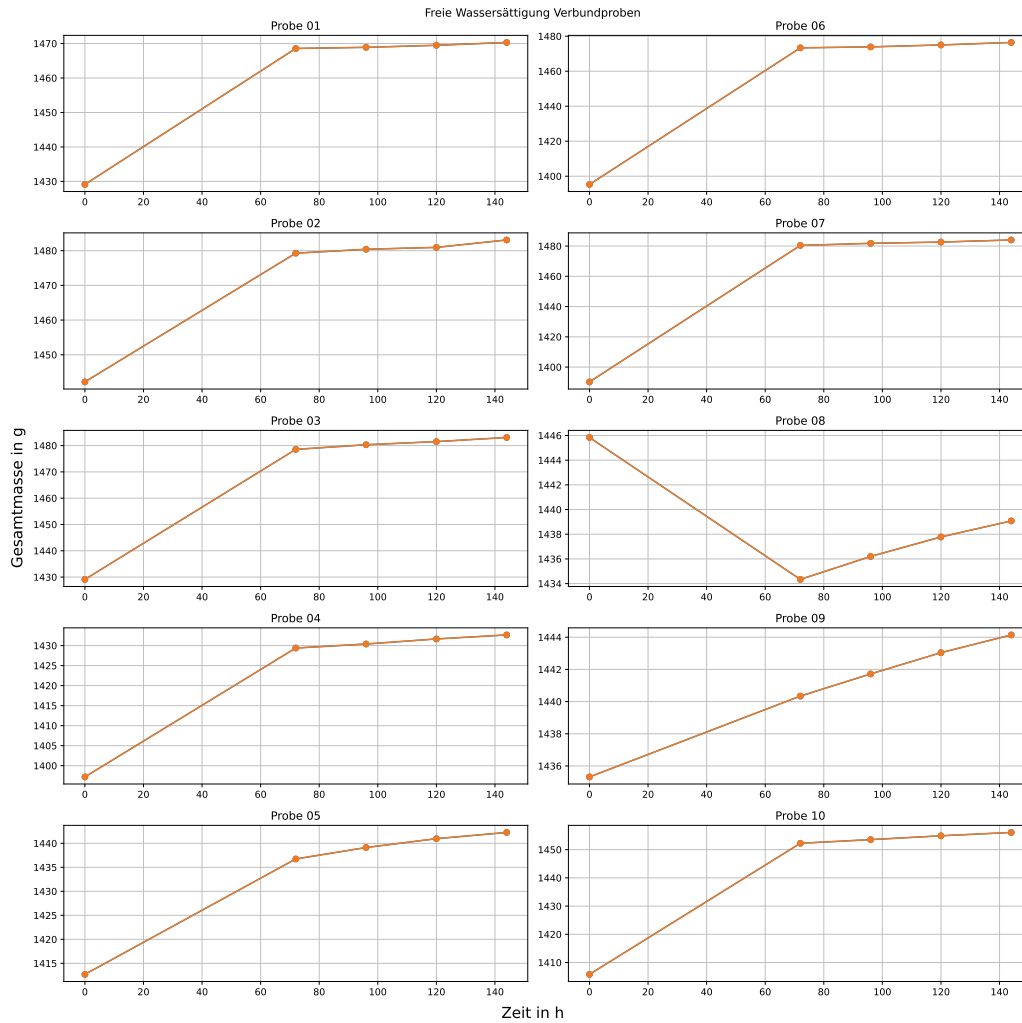


Abbildung 82: Verlauf der Gesamtmasse bei der Bestimmung der freien Wassersättigung an fünf Verbundproben. Probe 8 enthält einen Anfangsmessfehler. Die Zeitdauer bis zum Abbruch der Messung betrug ca. sechs Tage.

Trocknungsversuch

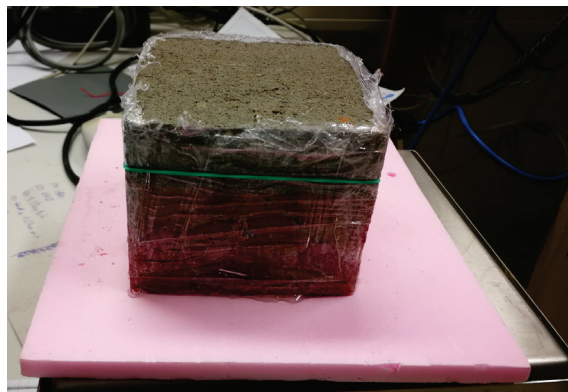


Abbildung 83: Trocknungsversuch: Verbundprobe 8, fünf Minuten nach Trocknungsbeginn.

Im Verlauf des Trocknungsversuchs ergab sich ein Unterschied zwischen der äußeren Erscheinung (Dunkelfärbung nassen Putzes) und der durch das Wiegen der Proben berechneten Trocknungsgeschwindigkeit. Die Probe schien zwar schon nach einer Stunde oberflächlich deutlich trockener zu sein, doch selbst nach acht Tagen konnte man beobachten, dass sie ca. 1 cm unter der Oberfläche noch feucht war (Abbildung 84).



Abbildung 84: Trocknungsversuch: Verbundprobe 8, acht Tage nach Trocknungsbeginn. Die Probe ist erst oberflächlich trocken (hellgrauer Bereich des Putzes). Foto: Sascha Zeiler.

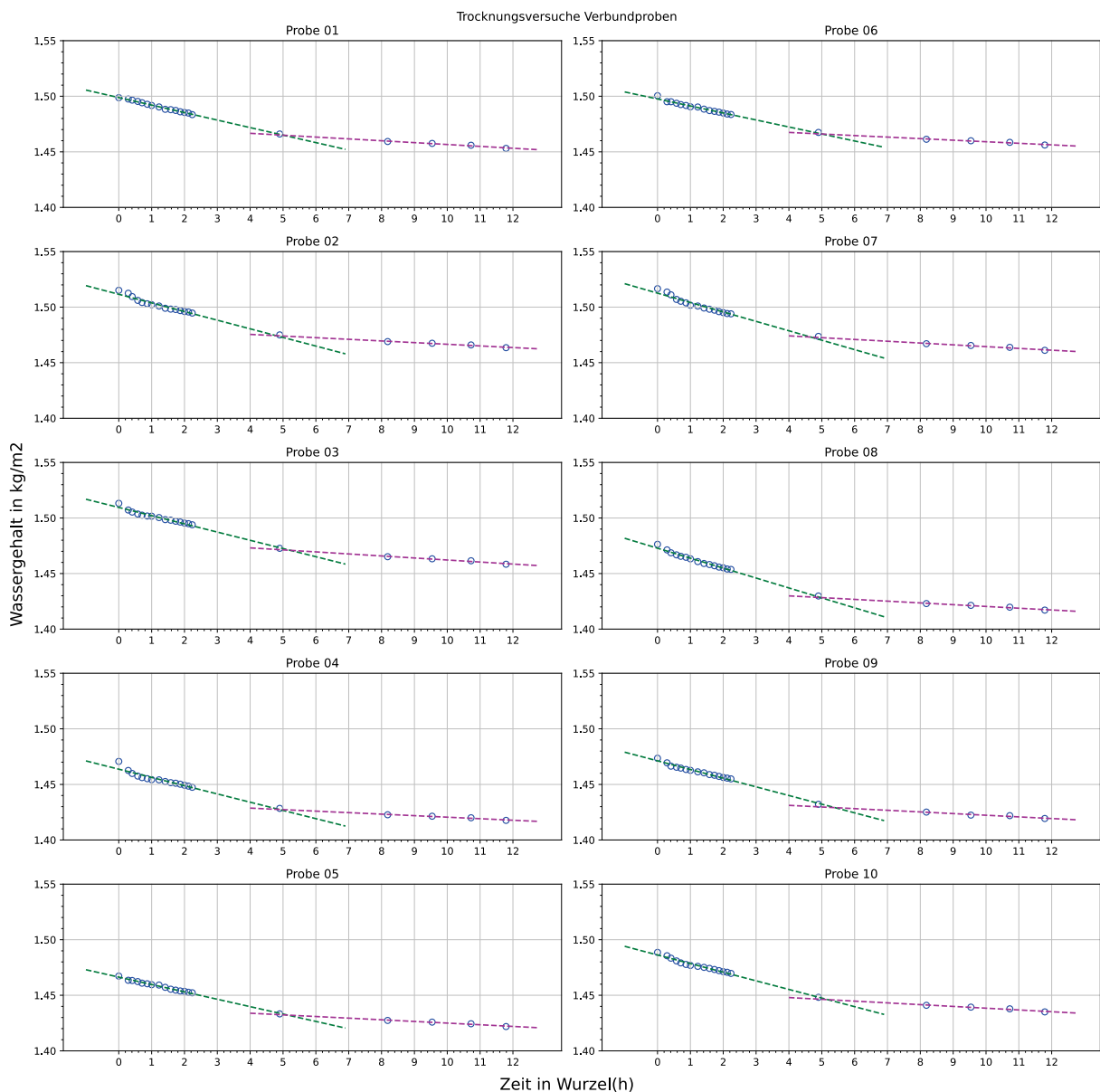


Abbildung 85: Verlauf der Masseabnahme der zehn Verbundproben während des Trocknungsversuchs. Blaue offene Ringe: Messpunkte; gestrichelte Linien: lineare Regression in zwei unterscheidbaren Trocknungsphasen.

5.5.2. Messung der reinen Putzproben

Es wurden fünf pure Diffupor®-Verputzproben (ohne Ziegel) vermessen. Da keine eigenen Verputzproben seitens des Herstellers beigestellt wurden, wurden Putzproben erzeugt, indem die Putzschichte einiger Verbundproben mittels Trennscheibe abgeschnitten wurde.

Aufsaugversuch – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Die Putzproben wurden aufgrund ihrer geringen Dicke „hochkant“ in das Wasser gestellt, sodass die Achse mit der größten Ausdehnung der quaderförmigen Probekörper vertikal ausgerichtet war (siehe auch Abbildung 87, S. 108).

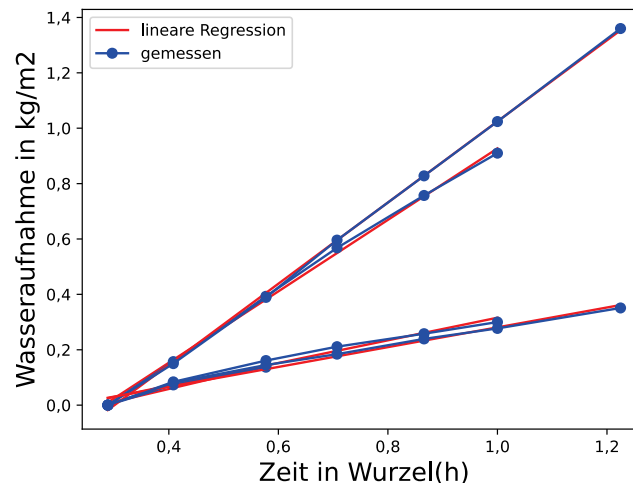


Abbildung 86: Übersichtsdiagramm zur Streuung des Verlaufs der Wasseraufnahme der fünf Putzproben im Aufsaugversuch. Dargestellt sind gemessene Kurven (blau) und Kurven, die aus den Messungen über lineare Regression ermittelt wurden (orange). Gemittelt über alle Proben resultiert ein mittlerer Wasseraufnahmekoeffizient von $0,80 \pm 0,48 \text{ kg/m}^2/\text{Wurzel(h)}$.

Asymmetrische Feuchteverteilung beim Hochsteigen der Feuchtefront

In den Saugversuchen mit den reinen Putzproben gab es Hinweise darauf, dass das Abtrennen des Putzes von den Verbundproben das Saugverhalten in der Nähe der Schnittfläche verändert haben könnte: Es wurde beobachtet, dass die Feuchtefront nahe der Schnittfläche der hochkant eingetauchten Probe und nahe der fertigen Putzoberfläche mit deutlich unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Abb. 13) anstieg. Allerdings kann die veränderte Porenstruktur, die diesen Effekt wahrscheinlich verursacht, in der Nähe der Schnittfläche – der Grenzfläche zwischen Putz und Ziegel – auch auf Randeffekten zwischen Ziegel und Putz beruhen. Diese sind von der mechanischen Abtrennung der Putzprobe unabhängig, z. B. eine Anreicherung von Feinanteilen, die aus dem frisch aufgetragenen Putz (in diesem Fall ein „Vorspritzer“) in den Ziegel wandern. Vgl. dazu auch [STA 86], Versuch 1.17, in dem die Wirkung der Anreicherung von Feinanteilen zumindest auf das Saugverhalten des Ziegels im Grenzflächenbereich Ziegel-Putz beschrieben wird. Zum Einfluss von Schichtgrenzen auf den Feuchtetransport in Ziegel-Putz-Verbundproben siehe auch [HOL 01], S. 27 ff., und Abschnitt 7.1.3. in [BED 00], S. 88 ff.



Abbildung 87: Aufsaugversuch, Foto der reinen Putzprobe 5, hochkant in das Wasser gestellt. Eine horizontal deutlich asymmetrische Feuchteverteilung ist erkennbar: Das Wasser steigt an einer Probenseite schneller hoch.

5.5.3. Materialparameter für die Simulation

Die in der Simulation verwendeten Materialdaten sind aus Vorprojekten wie beispielsweise [ZEL 17] entnommen. Für die Materialien Mauerwerk und Diffupor®-Putz wurden Parameterbestimmungen im Labor wie oben beschrieben durchgeführt. Weitere Materialkenngrößen sind Produktdatenblättern sowie der Masea Datenbank [MAS 21] entnommen.

Eine detaillierte Darstellung der Materialfunktionen von Mauerwerk, Diffupor®-Putz und Erdboden sind im Anhang 9.5 angegeben.

5.6. Intelligente Lüftungssteuerung

Im Projekt wurde ein Entscheidungsbaum für die Regelung der Lüftungsanlage erstellt, der als Grundlage für die Simulationen herangezogen wurde. Leitprinzipien für den Entscheidungsbaum sind:

1. Sofern es draußen trockener ist, kann gelüftet werden, denn dann erfolgt eine Entfeuchtung der Wohnung. Der Feuchtevergleich bezieht sich dabei auf die absolute Feuchte, angegeben in Gramm Wasser/m³ Luft oder in Gramm Wasser/kg trockene Luft.
2. Wenn es unter diesem feuchtetechnischen Aspekt möglich und auch sinnvoll ist zu lüften, weil es in der Nutzungseinheit noch nicht zu trocken ist, soll mit Maximalleistung gelüftet werden.
3. Besteht ein Zielkonflikt zwischen Hygiene, ausgedrückt über die CO₂-Konzentration als Indikatorgas für Emissionen des menschlichen Körpers, und feuchtetechnischer Anforderung, ist die hygienische Anforderung prioritär. Aus hygienischen Gründen ist es ausgeschlossen, zur Vermeidung einer Anfeuchtung über längere Zeit nicht zu lüften. Das bedeutet: Ist die Luft innen schadstoffbelastet (menschliche/tierische Emissionen, Emissionen aus Baustoffen) und ist die absolute Feuchte der Außenluft höher als innen, hat die Außenluft also kein Trocknungspotenzial, so wird dennoch gelüftet. Diese Priorisierung der Hygiene ist im Winterfall mit dem planerischen Grundsatz vergleichbar, dass eine Reduktion des hygienischen Luftwechsels zur Vermeidung des abluftseitigen Zueisens des Wärmetauschers bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen nicht zulässig ist ([ENE 12]).

Dem Entscheidungsbaum liegt das Prinzip einer feuchtegesteuerten Lüftung zugrunde. Die feuchtegesteuerte Lüftung ist auch in anderen Gebäudebereichen relevant, so z. B. in Dachböden. Vor allem im skandinavischen Raum ist das Thema der feuchtegesteuerten Lüftung unter den Schlagworten „cold attic“ und „adaptive ventilation“ bekannt. In Skandinavien (und Nordamerika) dominiert der Leichtbau mit einem erhöhten Risiko bei Balkendecken von Konvektion in der Heizperiode aus dem feuchtwarmen konditionierten Innenraum in den Dachboden. In einer skandinavischen Untersuchung von Strategien zur Vermeidung von Feuchteschäden in Kellern mit Wohnnutzung wurde der Lüftung an sich hingegen nur wenig Augenmerk geschenkt (ASP 2020). Gemäß den obigen Leitprinzipien stellt sich der Entscheidungsbaum wie folgt dar:

Entscheidungsbaum Kellerlüftung, Projekt Space4Free

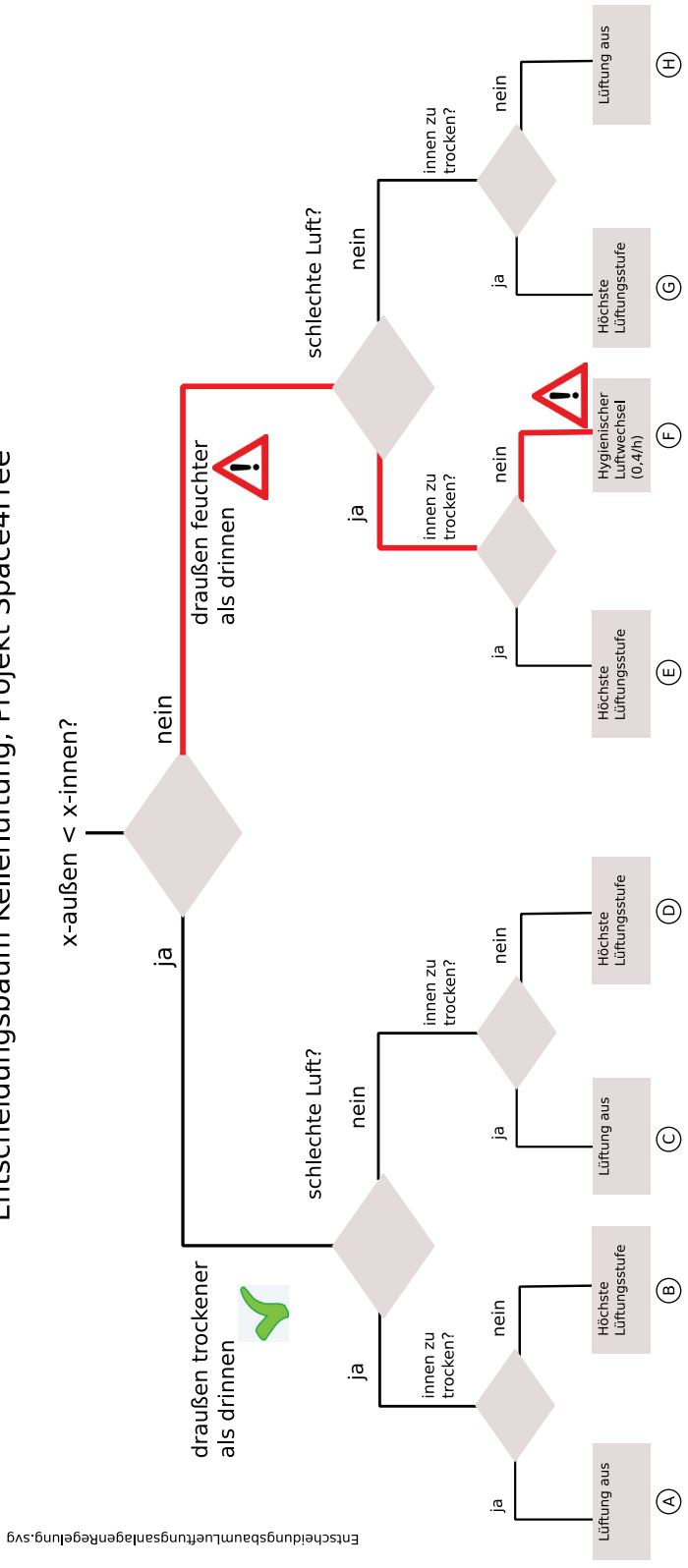


Abbildung 88: Regeltechnischer Entscheidungsbaum Kellerlüftung. Der kritische Entscheidungspfad/Fall ist rot eingezeichnet. Hier besteht aus hygienischer Sicht Lüftungsbedarf, wobei die Lüftung zur Aufweitung der Nutzungseinheit führt. Dies wird in Kauf genommen, da im Gesamtzeitverlauf das Schimmelrisiko ausreichend gering bleibt.

5.7. Hygrothermische Simulation

5.7.1. Jahresbilanzen

Um einen Überblick über die Wärme- und Feuchteflüsse der simulierten Souterrain-/Gartenwohnung zu erhalten, werden hier die entsprechenden Jahresbilanzen der Umschließungsflächen, inneren Lasten, Lüftung und Heizung dargestellt. Einen groben Überblick gibt folgende Zusammenfassung:

- Innere Lasten führen sowohl Wärme als auch Feuchte zu.
- Die Lüftung führt sehr viel Feuchte und in (durch Wärmerückgewinnung) abgeschwächtem Maß Wärme ab.
- Über Bauteile kommt es vor allem in den Wintermonaten zu Wärmeverlusten und (fast) über das ganze Jahr hinweg zu Feuchtezufuhr.
- Die Heizung führt Wärme zu, ohne die (absolute) Feuchte zu beeinflussen.

Im Weiteren werden diese Ergebnisse in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur und der maximalen Luftwechselrate der Lüftungsanlage diskutiert.

Wärmebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur

Die Wärmebilanz ist die Grundlage für die Berechnung des Heizwärmebedarfs. Dadurch spielt sie eine entscheidende Rolle bei der Beantwortung der Forschungsfrage, ob sich durch die Erschließung der Souterrain-Zone ein zusätzlicher Heizwärmebedarf des Gebäudes ergibt, oder ob der erschlossene Wohnraum ohne Zusatzbedarf geschaffen werden kann und in dieser Hinsicht kostenlos („space4free“) ist.

Hier ergibt sich, wie zu erwarten, dass der Heizbedarf deutlich ansteigt, wenn die Soll-Innentemperatur steigt. Ebenso erhöhen sich die Wärmeverluste durch die Lüftung und durch die Bauteile. Erstere fallen jedoch nicht stark ins Gewicht, da die Lüftungswärmeverluste aufgrund der Wärmerückgewinnung allgemein im Vergleich zu den anderen Wärmeströmen gering ausfallen. Die inneren Lasten sind wegen der Art, wie sie modelliert wurden, nicht von der Soll-Innentemperatur abhängig.

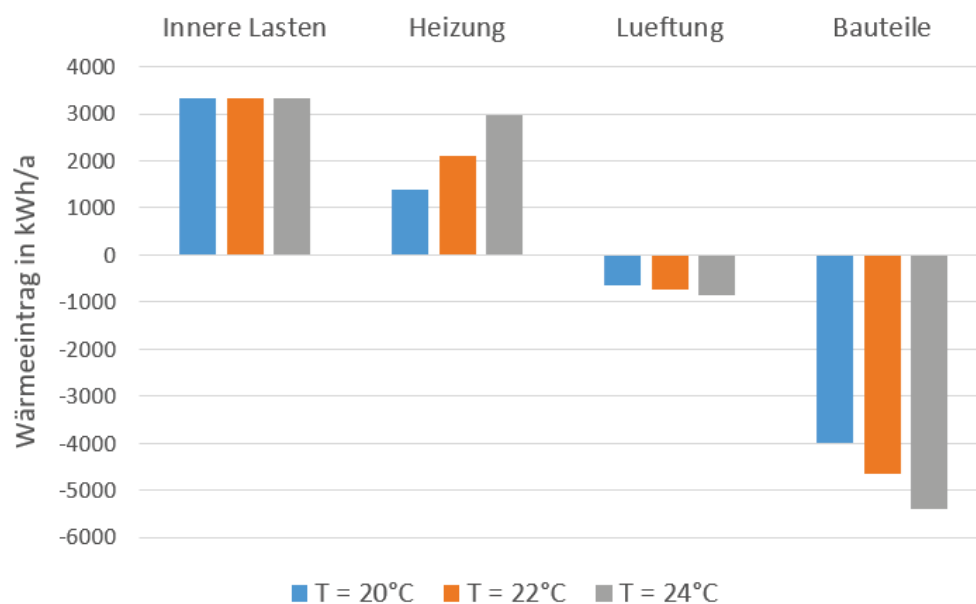


Abbildung 89: Wärmebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur. Die maximale Luftwechselrate beträgt bei diesen Varianten 0,6/h.

Wärmebilanz in Abhängigkeit der maximalen Luftwechselrate

Je höher die Luftwechselrate ist, desto höher ist auch die durch die Lüftungsanlage abgeführte Wärmemenge. Entsprechend muss die Heizung bei höheren Luftwechselraten der Zone mehr Wärme zuführen. Interessant zu beobachten ist, dass die Wärmeverluste durch die Bauteile sinken, wenn die Luftwechselrate steigt. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Differenz zwischen Innen- und Außentemperaturen sinkt, wenn die Luftwechselzahl steigt.

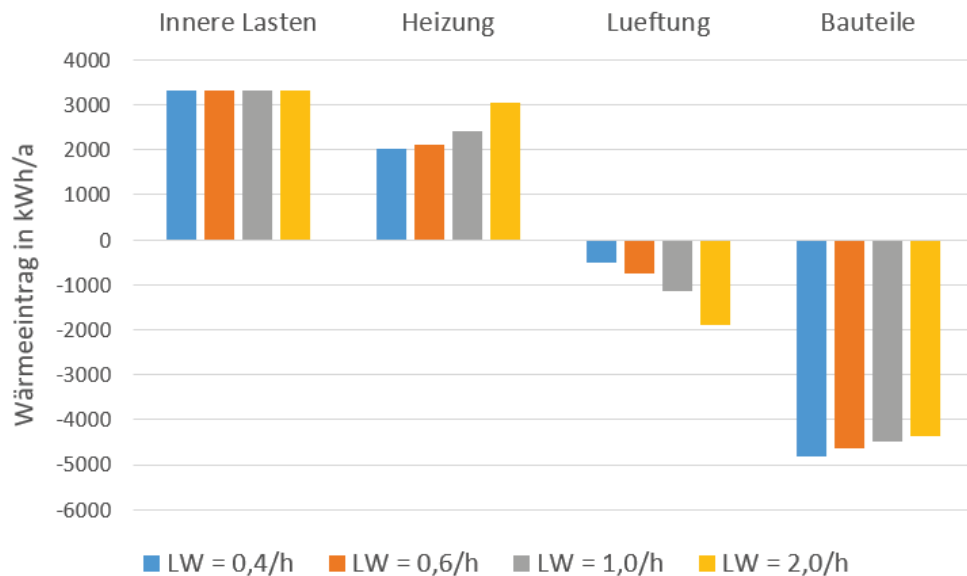


Abbildung 90: Wärmebilanz in Abhängigkeit der maximalen Luftwechselrate. Die Soll-Innentemperatur beträgt bei diesen Varianten 22°C.

Heizwärmebedarf

Aus den Wärmequellen lässt sich der Heizwärmebedarf der Zone berechnen. Dieser ist in Abbildung 91 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Heizwärmebedarf vor allem von der Soll-Innentemperatur abhängt. Die Luftwechselzahl hat nur dann einen starken Einfluss, wenn extreme Werte wie ein Luftwechsel von 2/h zum Tragen kommen.

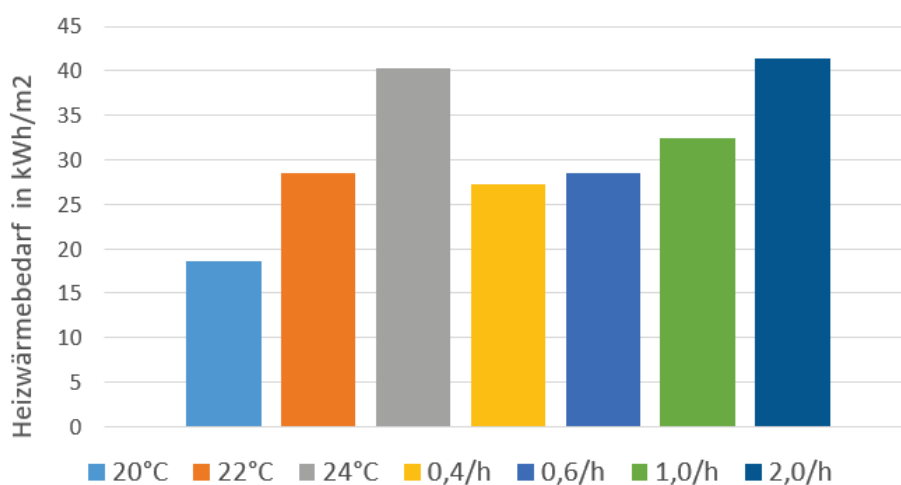


Abbildung 91: Heizwärmebedarf der Zone

Vergleicht man diesen Heizwärmebedarf mit den Wärmeverlusten der darüberliegenden Wohnung gegenüber dem unsanierten Keller (siehe Abschnitt 5.1), so stellt sich heraus, dass der zusätzlich geschaffene Wohnraum keine zusätzliche Heizwärme erfordert. Jede der Varianten ist daher als „space4free“ zu bezeichnen.

Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate

Ein überraschendes Ergebnis zeigt sich bei der Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate. Hier läge die Vermutung nahe, dass bei einer höheren Lüftungsrate infolge niedrigerer Luftfeuchte ein stärkerer Feuchteeintrag durch die umschließenden Bauteile erfolgen würde. Dieser Effekt kann jedoch nicht bzw. nur in minimalem Ausmaß beobachtet werden. Daraus ergibt sich auch, dass von der Lüftung in jeder Variante gleich viel Feuchte abgeführt wird, da die Feuchtebilanz immer ausgeglichen ist: Die Lüftung kann nicht mehr Feuchte abführen, als durch innere Nutzung und Bauteile zugeführt wird.

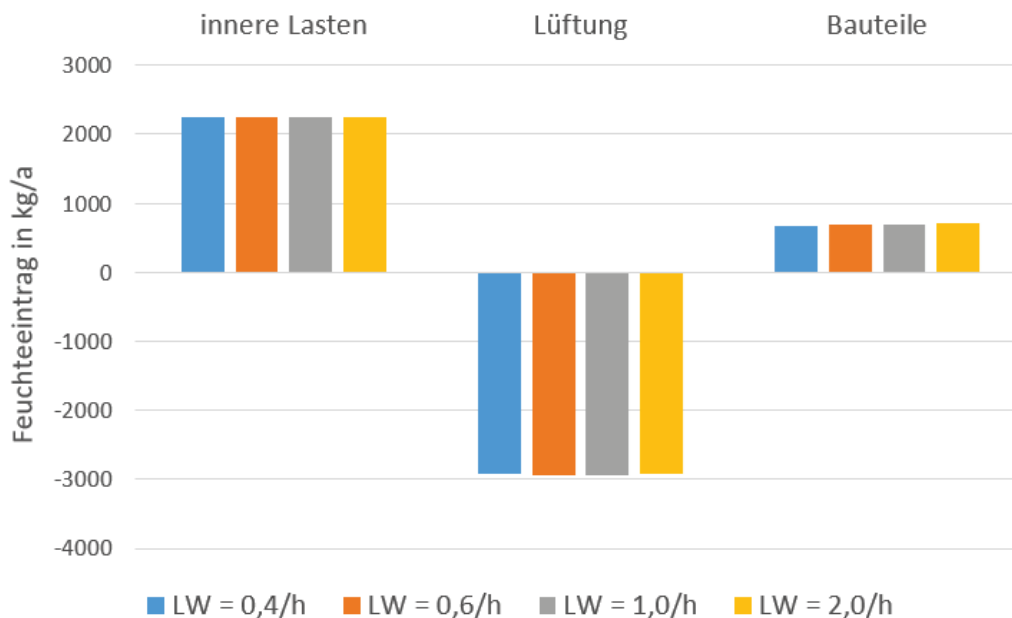


Abbildung 92: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate. Die Soll-Innentemperatur beträgt in diesen Varianten 22°C.

Der Grund dafür scheint zu sein, dass sich im eingeschwungenen Zustand ein gewisser Feuchtefluss vom Erdreich in die Zone einstellt, der nur unwesentlich von der Luftfeuchte in der Zone abhängt.

Zur Plausibilitätsprüfung ist hier die Feuchtebilanz des noch nicht eingeschwungenen Zustands dargestellt. Es handelt sich dabei um das erste Jahr der simulierten Wohnraumnutzung der Zone, in dem die Bauteile noch austrocknen. Hier ist deutlich ein Anstieg des Feuchteeintrags durch die Bauteile bei steigender Lüftungsrate zu beobachten. Zudem sieht man, wie zu erwarten, dass die Lüftung entsprechend mehr Feuchte abführt, wenn über die Bauteile mehr Feuchte zugeführt wird.

Bezugnehmend auf die formulierten Forschungsfragen zeigt sich in dieser Analyse, dass die Feuchteemissionen durch die Nutzung (Emissionen von Personen, Wäsche waschen, kochen ...) deutlich höher sind als die Emissionen aus Bauteilen.

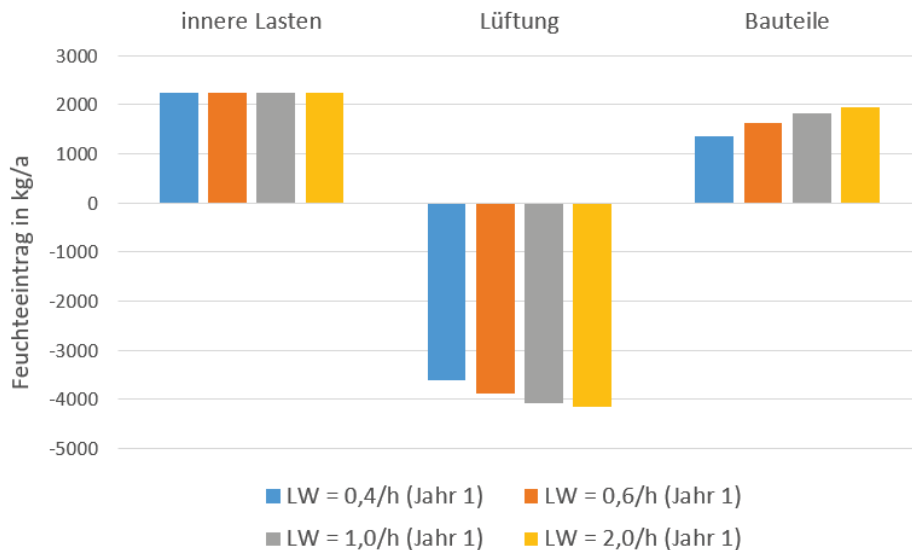


Abbildung 93: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate, bevor ein eingeschwungener Zustand erreicht wurde (erstes Simulationsjahr). Die Soll-Innentemperatur beträgt in diesen Varianten 22°C.

Die Forschungsfrage, ob eine Entfeuchtung des Kellerbereichs über eine feuchtegeregelte Lüftungsstrategie möglich ist, lässt sich wie folgt beantworten: Ein Vergleich der Feuchtebilanzen des zehnten Nutzungsjahres mit jenen des ersten Nutzungsjahres zeigt, dass eine Trocknung des Mauerwerks erfolgt ist. Diese Trocknung hat die reduzierte Feuchteemission im zehnten Nutzungsjahr zur Folge. Es ist daher der Schluss zulässig, dass eine dauerhafte Entfeuchtung des Kellerbereichs möglich ist.

Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur

Die zu- und abgeführte Feuchte hängt nicht oder nur minimal von der Soll-Innentemperatur ab.

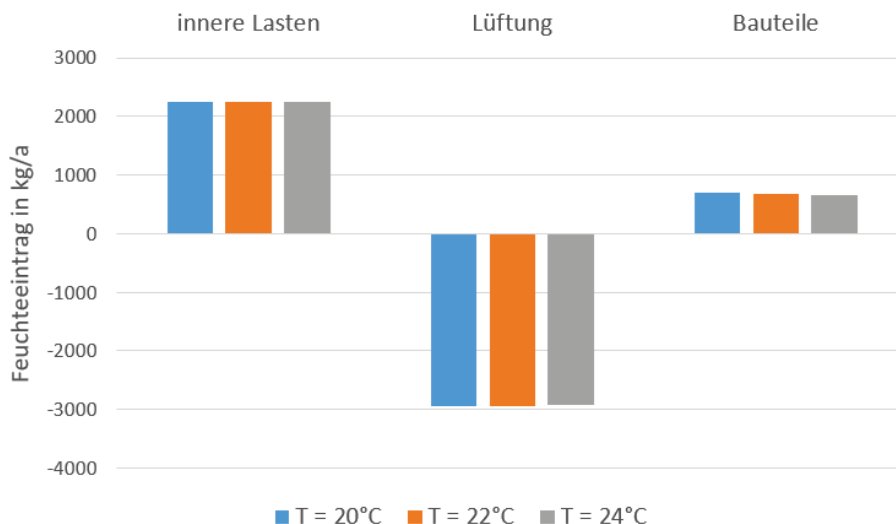


Abbildung 94: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur. Die maximale Luftwechselrate beträgt bei diesen Varianten 0,6/h.

Auch hier zeigt sich, dass die Emissionen infolge der Nutzung die Emissionen der Bauteile bei weitem übersteigen.

5.7.2. Monatliche Feuchtebilanz

In Abschnitt 5.7.1 wurden Jahresbilanzen betrachtet und verschiedene Varianten verglichen. In diesem Abschnitt wird die Feuchtebilanz im jahreszeitlichen Verlauf untersucht. Dies wird anhand der Basisvariante (Soll-Innentemperatur: 22°C, Luftwechsel: 0,6/h) in Abbildung 95 veranschaulicht.

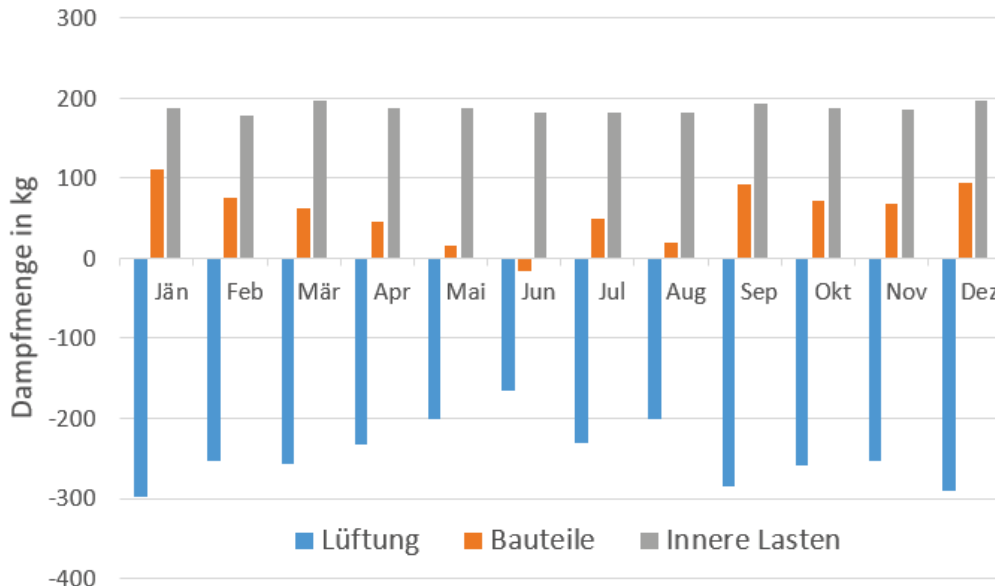


Abbildung 95: Feuchtebilanz im Jahresverlauf (Soll-Innentemperatur: 22°C, Luftwechsel: 0,6/h)

Während die inneren Lasten weitgehend gleichbleiben, variieren die von der Lüftung abgeführte Feuchte und die Dampfeinträge der umschließenden Bauteile erheblich. Die Bauteile geben vor allem in der kalten Jahreszeit viel Feuchte an die Zone ab. Das liegt daran, dass die trockene Winterluft zu einem geringeren Dampfdruck in der Zone führt, was eine verstärkte Diffusion zur Folge hat. Mit steigenden Außentemperaturen steigt der Dampfdruck in der Zone, wodurch sich die Diffusion verringert. Das geht in der dargestellten Variante so weit, dass die umschließenden Bauteile im Monatsmittel im Juni sogar als Feuchtesenken aufscheinen.

5.7.3. Schimmelrisiko

Die Analyse des Schimmelrisikos ist in Bezug auf die Forschungsfrage relevant, ob ein für Souterrain-/Gartenwohnungen hinreichendes Feuchtemanagement mit einer speziellen Lüftungsstrategie möglich ist. Dies wäre nicht gegeben, wenn gesundheitsschädliches Schimmelwachstum in den Wohnungen unvermeidbar wäre. Die Simulationsergebnisse zeigen jedoch, dass das Schimmelwachstum so minimal ist, dass keine Gesundheitsbeeinträchtigung zu erwarten ist.

Um das Schimmelrisiko zu bewerten, wurden

- kritische Stellen identifiziert,
- Oberflächentemperaturen und -feuchtwerte bestimmt sowie
- der Verlauf des Schimmelwachstums nach Ojanen [OJA 11] berechnet.

Identifikation der kritischen Stellen

Die kritischen Stellen für Schimmelwachstum befinden sich grundsätzlich dort, wo hohe Werte der relativen Feuchte auftreten. Diese sind an jenen Stellen zu erwarten, an denen die Oberflächentemperatur der Wand deutlich niedriger als die Lufttemperatur ist. Dieser Zustand ist vor allem im Sommer problematisch, weil in dieser Jahreszeit mit einer hohen relativen Luftfeuchte in der Zone zu rechnen ist.

Die kritische Stelle ist die erdberührte Wand, da sie im Sommer die niedrigste Oberflächentemperatur aufweist und das Erdreich in dieser Jahreszeit im Mittel kühler ist als die Außenluft.

Bestimmung der Oberflächentemperaturen

Um die Oberflächentemperaturen und -feuchtwerte zur Bewertung des Schimmelrisikos zu bestimmen, wurde eine gesonderte Simulation durchgeführt. Für diese wurde ein erhöhter Übergangswiderstand von $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ anstelle der ansonsten für horizontalen Wärmefluss an der Innenseite üblichen $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ angenommen, um eine Möblierung zu simulieren. Dies entspricht dem Übergangswiderstand, der infolge von Möblierung u. dgl. zu erwarten ist [KRU 09].

Dieser Übergangswiderstand wird vollflächig auf der entsprechenden Wand angenommen. Dadurch entsteht eine Wand, die vollständig von einem Schrank oder einem ähnlichen Möbelstück verdeckt ist. Das ist eine Annahme, die sich dafür eignet, die Schimmelfreiheit nachzuweisen, da die Wand bei einer vollflächigen Verdeckung eine niedrigere Temperatur aufweist als bei einer teilweisen Verdeckung. Tritt also bei vollflächiger Verdeckung kein Schimmel auf, ist eine teilweise Verdeckung jedenfalls unproblematisch.

Aus dieser Simulation ergibt sich ein zeitlicher Verlauf der Temperatur und der Feuchte an der Wandoberfläche hinter der Möblierung.

Bewertung des Schimmelrisikos nach Ojanen

Die Bewertung des Schimmelrisikos wurde nach [OJA 11] durchgeführt. Dabei werden Oberflächentemperaturen und -feuchtwerte in Bezug auf das Schimmelwachstum analysiert. Darüber hinaus wird die zu untersuchende Oberfläche in Abhängigkeit des Materials in eine Empfindlichkeitsklasse (siehe Tabelle 7) eingeteilt.

Tabelle 7: Empfindlichkeitsklassen verschiedener Materialien [OJA 11]

| Sensitivity class | Materials |
|-------------------|---|
| Very sensitive | Pine sapwood |
| Sensitive | Glued wooden boards, PUR with paper surface, spruce |
| Medium resistant | Concrete, aerated and cellular concrete, glass wool, polyester wool |
| Resistant | PUR polished surface |

Auf diese Art und Weise kann aus einer Zeitreihe von Temperatur- und Feuchtedaten ein zeitlicher Verlauf des Mould Index generiert werden. Dieser kann als Klasse des Schimmelwachstums verstanden werden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Mould Index als Stufen des Schimmelwachstums [OJA 11]

| Mould Index | Description of the growth rate |
|-------------|---|
| 0 | No growth |
| 1 | Small amounts of mould on surface (microscope), initial stages of local growth |
| 2 | Several local mould growth colonies on surface (microscope) |
| 3 | Visual findings of mould on surface, < 10 % coverage, or < 50 % coverage of mould (microscope) |
| 4 | Visual findings of mould on surface, 10 – 50 % coverage, or > 50 % coverage of mould (microscope) |
| 5 | Plenty of growth on surface, > 50 % coverage (visual) |
| 6 | Heavy and tight growth, coverage about 100 % |

Um den Worst Case darzustellen, wurde angenommen, dass ein Schrank aus Fichtenholz (pine wood – very sensitive) verwendet wird. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Lüftungsanlage eine maximale Luftwechselzahl von 0,4/h bereitstellen kann. In diesem Fall ergibt sich ein Jahresverlauf des Mould Index wie in Abbildung 96 dargestellt.

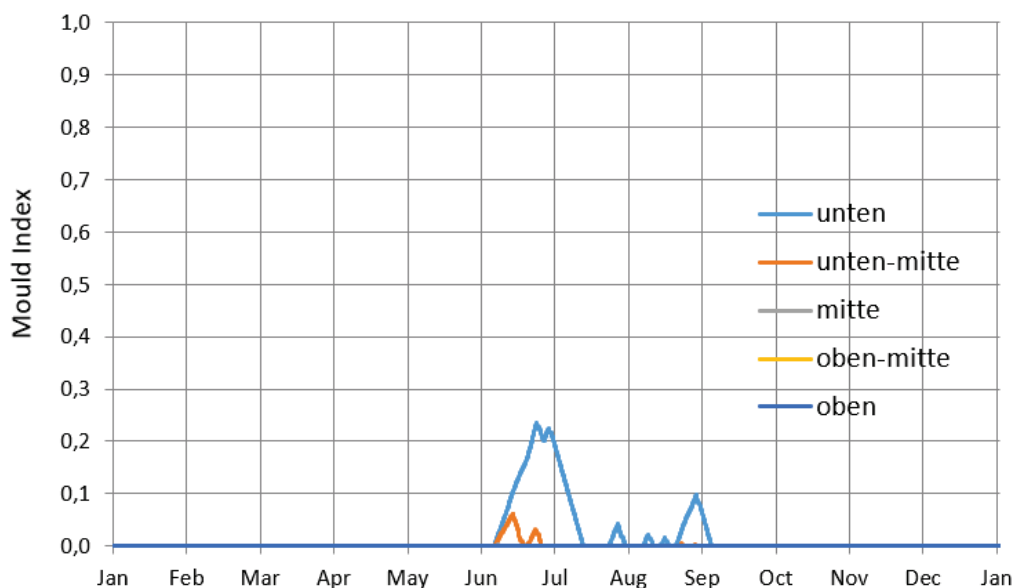


Abbildung 96: Mould Index im Jahresverlauf an der erdberührten Wandoberfläche in verschiedenen Höhen. Soll-Innentemperatur 22°C, maximale Luftwechselrate 0,4/h.

Es ist zu sehen, dass es zu keinem nennenswerten Schimmelwachstum kommt. Der Mould Index erreicht im Jahresverlauf nicht einmal annähernd den Wert 1. Selbst ein Wert von 1 würde lediglich zu einem unter dem Mikroskop erkennbaren Schimmelwachstum führen. In den verbleibenden Jahreszeiten ist es hinreichend trocken, sodass sich der Mould Index wieder auf null reduziert.

5.7.4. Raumklima und Behaglichkeit

Bei der Simulation ergibt sich unter anderem der zeitliche Verlauf des Zustandes der Raumluft. Für die Behaglichkeit sind gewisse Parameter ausschlaggebend. Dazu zählen Temperatur, Luftfeuchte, Strahlungssymmetrie, Luftbewegung, Bekleidung von Personen (siehe ÖNORM EN ISO 7730). Ein grobes Bild kann man sich jedoch bereits aus der Kenntnis von Temperatur und relativer Luftfeuchte machen [LEU 51]. Demnach sollten sich Temperatur und Luftfeuchte innerhalb des Behaglichkeitsfeldes oder zumindest innerhalb des erweiterten Behaglichkeitsbereichs befinden (Abbildung 97). Diese Auswertungen sind relevant in Bezug auf die Forschungsfrage, ob ein für Wohnräume adäquates Feuchtemanagement in sanierten Souterrainbereichen mit einer speziellen Lüftungsstrategie möglich ist.

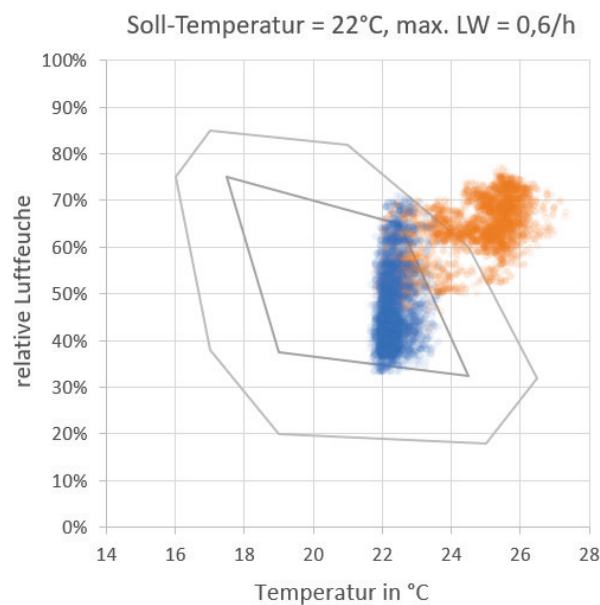


Abbildung 97: Raumluft-Zustände der Basisvariante im Behaglichkeitsfeld (Viereck) und erweitertem Behaglichkeitsfeld (Achteck). (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr)

Das Behaglichkeitsfeld nach [LEU 51] bewertet eine Temperatur von 18°C als gleich behaglich wie eine Temperatur von 24°C. Je höher die Temperatur, desto trockener sollte die Luft sein. Dieser Behaglichkeitsbereich ist vom Temperaturbereich her niedrig angesetzt, 20-26°C erscheinen realistischer. Die Darstellung des Behaglichkeitsbereichs nach [LEU 51] ist jedoch weit verbreitet, daher wurden die Raumluftzustände hier in Bezug auf diese Referenz dargestellt. Dennoch kann man, wenn die Punktwolke der Raumluftzustände über den rechten Rand des Behaglichkeitsbereichs hinausragt, nicht automatisch auf ein unbehaglich warmes Raumklima schließen.

In Abbildung 97 ist zu sehen, dass sich die Temperatur zwischen 22°C und 27°C bewegt, wobei eine Überschreitung von 26°C nur selten vorkommt. Die thermische Behaglichkeit ist also weitgehend gegeben. Die Luftfeuchte bewegt sich im Bereich von 35 bis 75%. Die Überschreitung der 70%-Marke ist dabei nicht als selten zu betrachten. Es ist also in den Sommermonaten mit Unbehagen aufgrund eines schwülen Raumklimas zu rechnen.

In Abbildung 98 ist die Auswirkung der Luftwechselrate auf die Zustände der Raumluft dargestellt. Dabei ist zu bemerken, dass sich die Temperatur dadurch kaum ändert. Was sich jedoch stark ändert, ist die relative Feuchte der Raumluft. Während bei einer maximalen Luftwechselzahl von 0,4/h die Feuchte nie unter 40% sinkt, so liegt bei einer Luftwechselzahl von 1,0/h ein beträchtlicher Anteil der

Raumluftzustände im Winterhalbjahr unterhalb von 40%. Im Sommerhalbjahr steigt die relative Feuchte bei der schwächeren Lüftung bis knapp unter 80%.

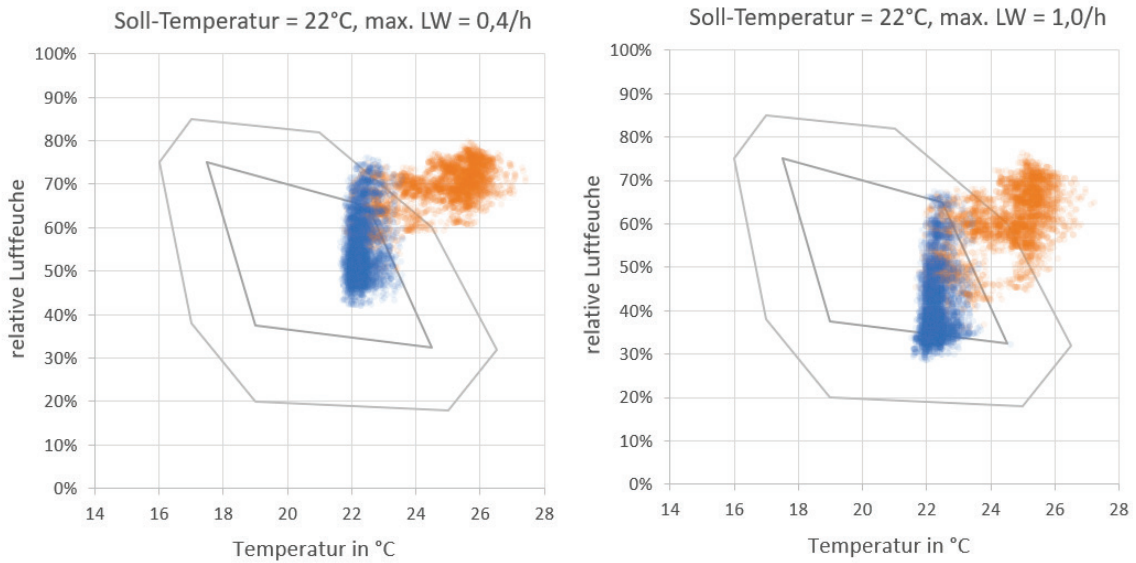


Abbildung 98: Raumluft-Zustände bei Variation der Luftwechselzahl (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr)

Wird die Soll-Innentemperatur variiert, so ergibt sich naturgemäß vor allem eine Veränderung der Mindesttemperatur im Winterhalbjahr. Das führt unter anderem dazu, dass die relative Feuchte im Winterhalbjahr sinkt. Sie bleibt jedoch oberhalb von 30% und ist daher als unproblematisch zu betrachten (Abbildung 99).

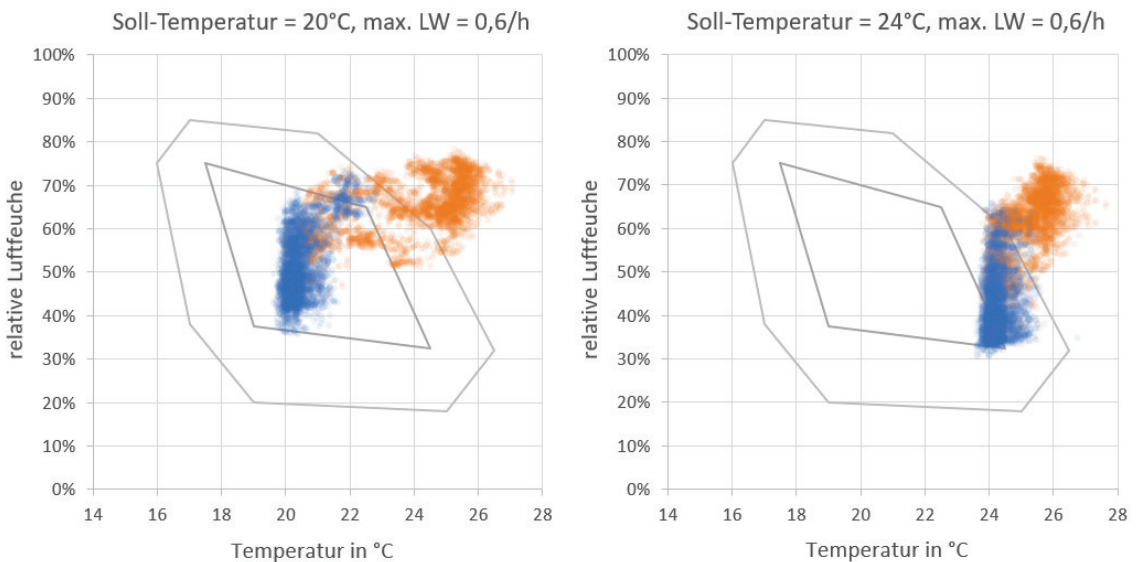


Abbildung 99: Raumluft-Zustände bei Variation der Soll-Innentemperatur (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr)

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden kritische Werte für Temperatur und relative Feuchte definiert und die Häufigkeit deren Überschreitung ermittelt. Definiert man für die Temperatur 26°C und für die relative Luftfeuchte 70%, so ergeben sich Überschreitungshäufigkeiten in Stunden pro Jahr (Abbildung 100). Auffällig ist dabei vor allem, dass die Simulationsvariante mit einem reduzierten maximalen Luftwechsel von 0,4/h eine hohe Anzahl von Überschreitungsstunden betreffend relativer Luftfeuchte

aufweist. Die Varianten mit erhöhter Luftwechselzahl weisen hingegen verhältnismäßig geringe Überschreitungshäufigkeiten auf. Die Soll-Temperatur bei diesen beträgt 22°C. Die Basisvariante (Soll-Temperatur: 22°C, maximaler Luftwechsel: 0,6/h) weist eine moderate Zahl von Überschreitungsstunden auf.

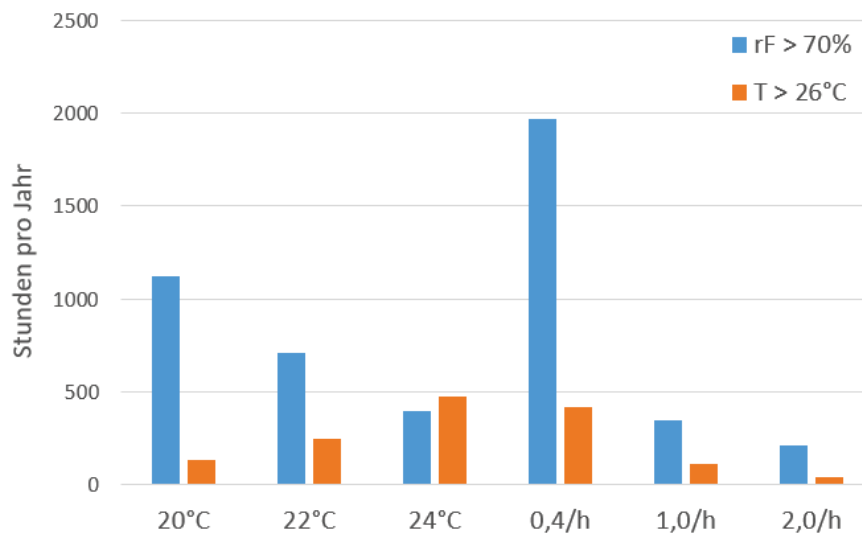


Abbildung 100: Überschreitungshäufigkeiten von 70% relativer Luftfeuchte und 26°C Raumlufttemperatur für die Simulationsvarianten

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle Varianten grundsätzlich als behaglich eingestuft werden können. Es kommt jedoch in allen Varianten zu einem schwülen Raumklima im Sommerhalbjahr. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass eine feuchtegesteuerte Lüftungsstrategie dazu geeignet ist, sanierte Souterrain-/Gartenwohnungen zu belüften und ist daher in Bezug auf die entsprechende Forschungsfrage relevant.

5.7.5. Effizienz der Entfeuchtungsstrategie

Die Entfeuchtung basiert auf der Differenz der absoluten Feuchte zwischen Innenluft und Außenluft. Dabei wird jedoch während der Heizsaison ein gewisser Wärmeverlust infolge des Luftaustauschs hingenommen. Bei einer sehr geringen Feuchtedifferenz, aber gleichzeitig einer hohen Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und Außenluft kann dies dazu führen, dass für einen sehr geringen Trocknungseffekt ein verhältnismäßig großer Wärmeverlust in Kauf genommen werden muss. In diesem Fall kann sich diese Entfeuchtungsstrategie als ineffizient erweisen. Umgekehrt kann es im Sommer dazu kommen, dass die Zone im Zuge der Entfeuchtung ungewollt erwärmt wird. Darüber hinaus ist der elektrische Energieverbrauch des Ventilators in Betracht zu berücksichtigen. In diesem Abschnitt wird diskutiert, mit welchem Energieaufwand diese Art der Entfeuchtung einhergeht.

Um den Stromverbrauch der Lüftungsanlage zu schätzen, wurde ein SFP-Wert von 2 kW/(m³/s) angenommen. Dies entspricht 0,56 Wh/m³. Dieser Wert ist als passend für eine Anlage mit Wärmerückgewinnung zu betrachten [SCH 09].

Um die Frage des thermischen Energieverlustes behandeln zu können, muss zwischen Heiz- und Kühlfall unterschieden werden. In ersterem ist ein thermischer Energieeintrag in die Zone als Gewinn, im zweiten als Verlust zu betrachten. Um eine eindeutige Unterscheidbarkeit zu erzielen, wurden für diese Betrachtung Zeiträume gewählt, die zur Gänze innerhalb der Heizperiode (Dezember, Jänner,

Februar) bzw. innerhalb der Kühlperiode (Juni, Juli, August) liegen. Anschließend wurden für diese Zeiträume die stündlichen Lüftungsfälle statistisch ausgewertet.

Durch die Kenntnis der absoluten Feuchte innen und außen sowie der Temperatur innen und außen kann aus der Luftwechselrate zu jedem Zeitpunkt der Wärmeverlust oder -eintrag durch die Lüftung berechnet werden. Gleiches gilt für die Feuchte. Darüber hinaus kann durch die Annahme des SFP der Lüftungsanlage der Energieverbrauch durch den Ventilator berechnet werden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Lüftungsanlage auf die jeweilige Luftwechselzahl ausgelegt ist. Das heißt, eine Anlage für eine Luftwechselzahl von 1,0/h muss über deutlich größere Kanalquerschnitte verfügen als eine Anlage, die für eine Luftwechselzahl von 0,6/h ausgelegt ist. Dadurch kann zu jedem Zeitpunkt die investierte thermische und elektrische Energie pro abgeführter Feuchte berechnet werden. Diese Größe in kWh/kg wird in diesem Abschnitt betrachtet.

Da sich die Innen- und Außenwerte ständig ändern, ergibt sich nicht ein einzelner Wert, sondern eine statistische Verteilung. Von dieser werden in diesem Abschnitt

- der Median (die Hälfte der Werte liegt darunter, die andere Hälfte darüber; 50% Quantil),
- das 10% Quantil (10% der Werte liegen darunter, 90% der Werte liegen darüber) sowie
- das 90% Quantil (90% der Werte liegen darunter, 10% der Werte liegen darüber)

betrachtet.

Der Median gibt Auskunft über den typischen zu erwartenden Fall. Das 10% Quantil ist ein günstiger Fall, bei dem wenig Energie investiert werden muss, um ein Kilogramm Feuchte abzuführen. In 10% der Fälle wird so viel oder noch weniger Energie dafür benötigt. Das 90% Quantil ist der ungünstige Fall, bei dem viel Energie investiert werden muss. Nur in 10% der Fälle muss noch mehr investiert werden, um einen Kilogramm Feuchte abzuführen. Diese Quantile sind aussagekräftiger als Maximal- oder Minimalwerte, da es sich bei Letzteren meist um statistische Ausreißer handelt. Durch die Kenntnis des 10% und des 90% Quantils ist es möglich, die Situation einzuschätzen, da in 80% der Fälle der Wert zwischen diesen beiden liegt.

Neben den Ergebnissen der Simulationsvarianten wird hier auch eine Auswertung der Monitoringdaten für das Objekt B_W2 angeführt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse hier mit jenen der Simulationsvariante 24°C weitgehend übereinstimmen.

In Abbildung 101 ist die Verteilung des Energieaufwands pro abgeführter Feuchtemenge im Winterfall dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Energieaufwand kaum von der Soll-Innentemperatur abhängt, sondern deutlich mit der Luftwechselzahl steigt. Für Details zu den Simulationsvarianten siehe Tabelle 2 auf Seite 50. Der Anstieg mit steigender Luftwechselzahl erklärt sich daraus, dass die stärkere Lüftung im Winter zu einer trockeneren Innenluft führt. Dadurch kann pro ausgetauschtem Kubikmeter Luft weniger Feuchte abgeführt werden. Der Energieaufwand pro ausgetauschtem Kubikmeter Luft bleibt jedoch weitgehend gleich.

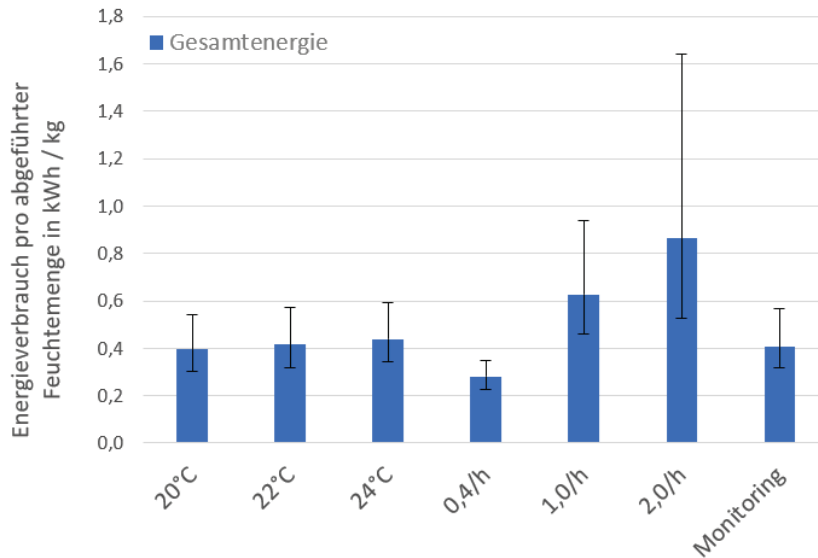


Abbildung 101: Median des benötigten Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Winter. Die Fehlerindikatoren zeigen das 10% und das 90% Quantil an. (80% der Fälle liegen dazwischen.)

Außerdem ist zu sehen, dass die Schwankungsbreite der Fälle mit ansteigendem Luftwechsel stark zunimmt. So ist bei einem Luftwechsel von 2/h in 10% der Fälle ein Energieaufwand von über 1,6 kWh erforderlich, um ein Kilogramm Feuchte abzuführen.

Abbildung 102 zeigt, wie sich die Energie auf die Antriebsenergie des Ventilators und die thermische Energie verteilt. Dabei ist zu sehen, dass die thermische Energie trotz 85% Wärmerückgewinnung deutlich überwiegt.

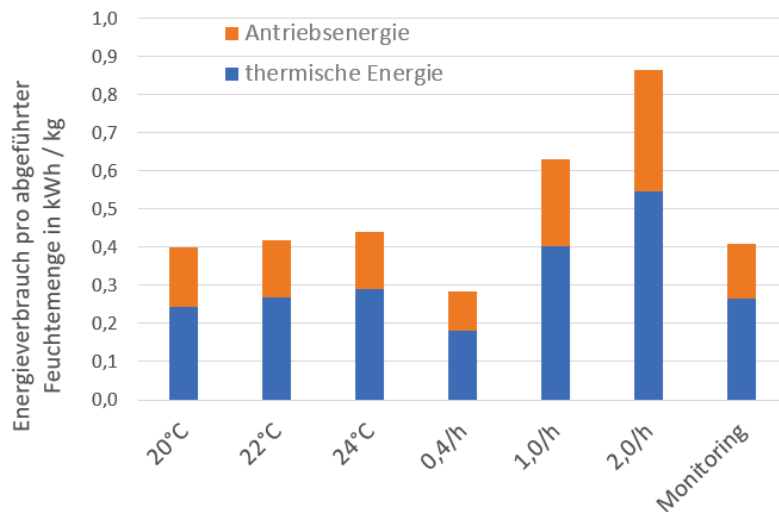


Abbildung 102: Zusammensetzung des Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Winter aus thermischer Energie und Energieverbrauch der Lüftungsanlage

Im Sommerfall ist die Schwankungsbreite weitaus höher, wie in Abbildung 103 ersichtlich. Das kann dadurch erklärt werden, dass die Außenluftfeuchte im Sommer stärkeren Schwankungen ausgesetzt ist und dadurch die Menge an abgeführter Feuchte, die ja proportional ist zur Differenz der absoluten Innen- und Außenfeuchte, stark schwankt.

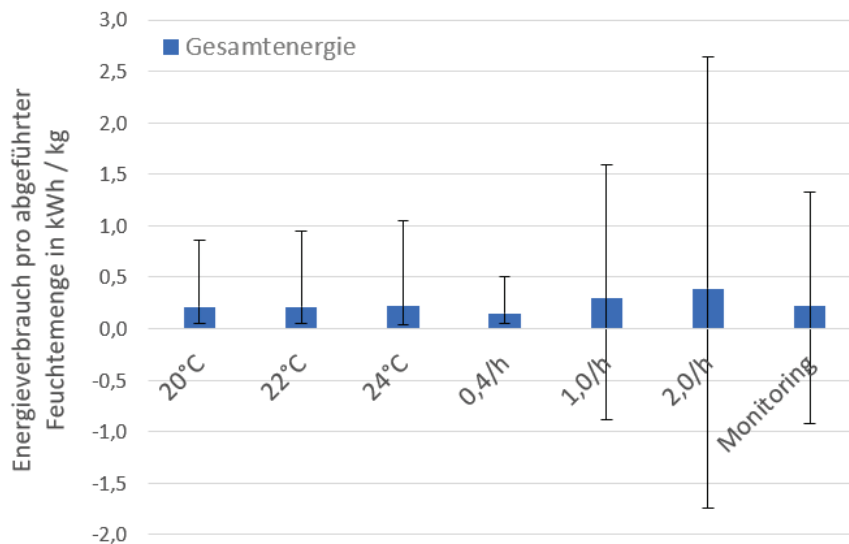


Abbildung 103: Median des benötigten Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Sommer. Die Fehlerindikatoren zeigen das 10% und das 90% Quantil an. (80% der Fälle liegen dazwischen.)

Abbildung 104 zeigt die Verteilung der Gesamtenergie auf die Antriebsenergie des Ventilators und die thermische Energie. Im Gegensatz zum Winterfall ist zu sehen, dass erstens die Antriebsenergie bei weitem überwiegt. Zweitens wird im Medianfall thermische Energie abgeführt. Es ist also im betrachteten Zeitraum (Juni, Juli, August) in mehr als 50% der Fälle außen kühler als innen. Das zeigt, welche ein großes Potential Sommerkühlung durch Nachtlüftung hat.

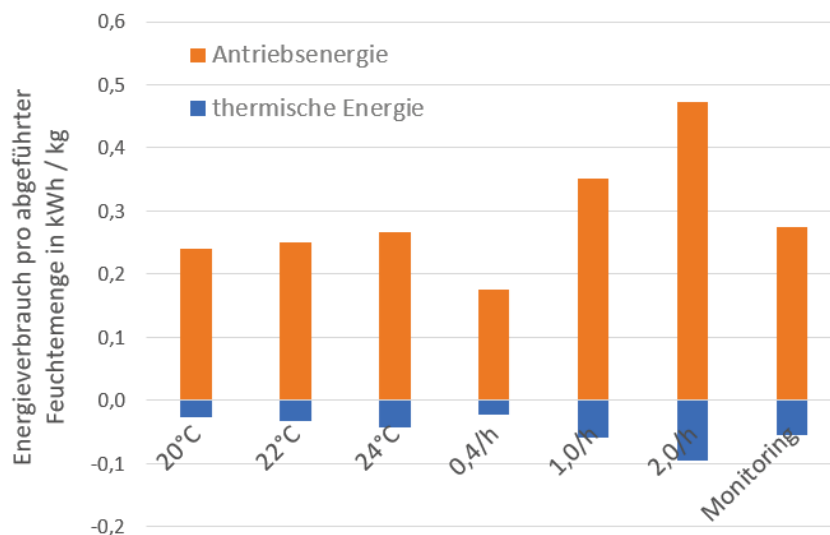


Abbildung 104: Zusammensetzung des Energieaufwands aus thermischer Energie und Energieverbrauch der Lüftungsanlage für das Abführen eines Kilogramms Feuchte im Sommer

6 Schlussfolgerungen

6.1. Kernaussagen des Projekts – Analyse der Forschungsfragen

Ist der Heizwärmebedarf der Souterrainwohnungen gleich groß oder kleiner als die Wärmeverluste durch einen ungenutzten und unkonditionierten Keller?

Es wurden sowohl die Nutzung der Souterrain-Zone nach der Sanierung als auch die Nutzung des unsanierten Altbaus simuliert. Bei der Simulation des unsanierten Altbaus wurde der Wärmeverlust der untersten Wohnung durch den Fußboden zum ungenutzten Keller berechnet. Dabei ergibt sich je nach Belüftung der Keller-Zone ein Wärmeverlust zwischen 54,5 kWh/m²a und 87,7 kWh/m²a (siehe Abschnitt 5.1). Dem steht der Heizwärmebedarf der sanierten Souterrain-/Gartenwohnung gegenüber. Dieser bewegt sich, je nach Soll-Innentemperatur und Luftwechselzahl, zwischen 18 kWh/m²a und 42 kWh/m²a (siehe Abschnitt 5.7.1). Die Gegenüberstellung ist in Abbildung 105 zu sehen.

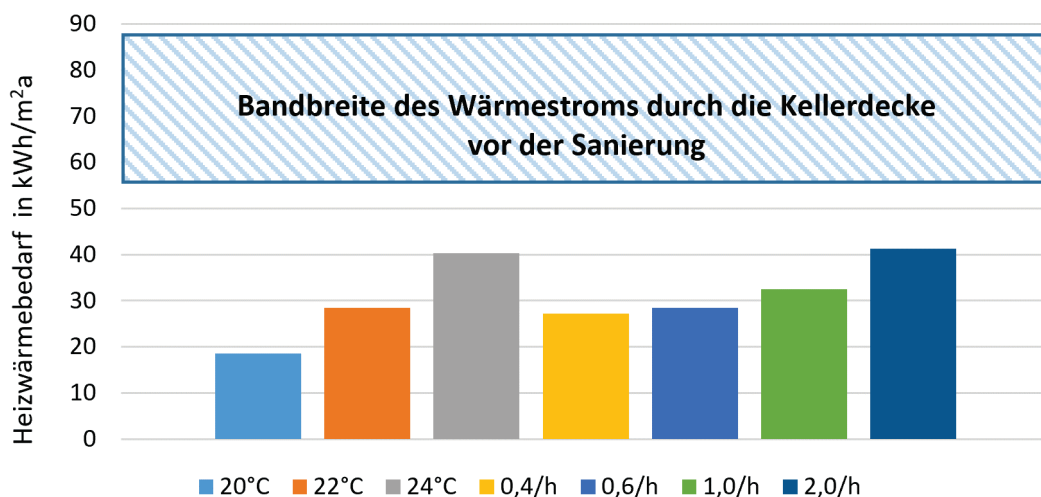


Abbildung 105: Gegenüberstellung des Wärmeverlusts der Erdgeschoßwohnung durch die Kellerdecke vor der Sanierung des Kellers (schraffierte Fläche) und des Heizwärmebedarfs der sanierten Souterrain-/Gartenwohnung. Der HWB der Gartenwohnungen ist durchwegs geringer als der Wärmeverlust durch die Kellerdecke vor der Sanierung.

Da der Heizwärmebedarf jeder einzelnen der simulierten Varianten unter der Bandbreite des Wärmeverlusts durch die Kellerdecke vor der Sanierung liegt, wird im Zuge der Sanierung Wohnraum geschaffen, ohne einen zusätzlichen Heizwärmebedarf zu erzeugen. Teilweise ist der Heizwärmebedarf nach der Sanierung sogar vermindert. Hierbei ist anzumerken, dass der Wärmeverlust einer ungedämmten untersten Geschoßdecke vor der Sanierung mit dem Heizwärmebedarf verglichen wird, der sich bei dem durch die Sanierung geschaffenen modernen Gebäudestandard ergibt.

Die primäre Kernaussage „space4free“ ist: Das Verhältnis des Energieverbrauchs ungenutzter Kellerbereiche und als Souterrain-/Gartenwohnung ausgebauter Kellerbereiche beträgt im Best Case 1 : 0,22 und im Worst Case 1 : 0,72. In jedem der untersuchten Fälle waren die Wärmeverluste durch

die Kellerdecke des unsanierten Kellerbereichs deutlich größer als der Heizwärmebedarf der sanierten Souterrain-/Gartenwohnung.

Kann ein Kellerbereich mittels feuchtegeregeltem Luftwechsel mit der Außenluft dauerhaft entfeuchtet werden?

In der Simulation zeigt sich, dass die Feuchteemissionen der Bauteile im Verlauf der Nutzung von Jahr zu Jahr abnehmen (siehe Abschnitt 5.7.1). Daraus lässt sich schließen, dass der Feuchtegehalt im Mauerwerk im Zuge der Nutzung sinkt. Dieser Umstand ist vor allem auf die Beheizung und feuchtegeregelte Belüftung der Souterrain-Zone zurückzuführen. Es ist demnach also möglich, den Kellerbereich mit der in Abschnitt 5.6 beschriebenen Lüftungsstrategie dauerhaft zu entfeuchten.

Ist ein Feuchtemanagement für Wohnbereiche mit einer speziellen Lüftungsstrategie möglich?

In Bezug auf das Feuchtemanagement im Wohnbereich wurden zwei Dinge untersucht:

- Schimmelrisiko
- Behaglichkeit

In Abschnitt 5.7.3 wird gezeigt, dass es bei den Simulationsvarianten zu keinem nennenswerten Schimmelrisiko kommt. Der Mould Index nach Ojanen/Viitanen [OJA 11] ist annähernd null. Dies ergibt sich selbst bei den pessimistischsten Annahmen in Bezug auf Lüftungsrate und Empfindlichkeitsklasse der betrachteten Materialien.

Im Abschnitt 5.3.2 wird gezeigt, dass laut Monitoringdaten in den meisten Wohnungen kein Schimmelrisiko besteht. Lediglich bei einer Wohnung war aufgrund erhöhter Feuchtwerte eine gesonderte Betrachtung erforderlich. Selbst dort erweist sich jedoch, dass nur auf wandberührten Möbelstücken ein unter dem Mikroskop erkennbares Schimmelpilzwachstum zu erwarten ist.

In Bezug auf die Behaglichkeit, wird in Abschnitt 5.7.4 gezeigt, dass alle Simulationsvarianten grundsätzlich als behaglich eingestuft werden können. Es kommt jedoch in allen Varianten zu schwülem Raumklima in den Sommermonaten.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass das Feuchtemanagement durch eine feuchtegesteuerte Lüftungsstrategie möglich ist. Die Auswertungen nach ÖNORM EN ISO 13788 zeigen deutlich die Temperaturpufferung über das Jahr hinweg. Dies hat während der Wintermonate den Vorteil, dass die Bauteile angenehm warm sind und zur Einsparung von Heizenergie beitragen, während der Sommermonate sind die Bauteile jedoch tendenziell zu kühl, wodurch das Risiko für Schimmelpilzbildung infolge zu hoher Raumluftfeuchte ansteigt.

Wie realistisch sind Berechnungen bzw. hygrothermische Simulationen in Bezug auf Planbarkeit und Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?

Grundsätzlich sind für die Durchführung einer hygrothermischen Gebäudesimulation zumeist Annahmen zu treffen, da nicht alle Eingangsparameter im Vorfeld messtechnisch bestimmt werden können. Materialeigenschaften und Beschaffenheit des Erdreichs seien hier als Beispiele genannt. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist von diesen Annahmen abhängig. Daher kann es immer zu Abweichungen zwischen Simulationsergebnis und Realität kommen. Es wurde jedoch im Abschnitt 5.3.2 gezeigt, dass die im Monitoring erhobenen Feuchtehäufigkeiten jenen in der Hauptvariante der Simulation (Soll-Innentemperatur 22°C; Luftwechselrate 0,6/h) ähnlich sind. Das weist darauf hin, dass die Simulation in dieser Hinsicht die Realität mit einer hohen Genauigkeit

abbildet. Die Simulation überschätzt jedoch vor allem bei den hohen Feuchtwerten deren Häufigkeit. Dadurch ist die Simulation gut dazu geeignet, eine pessimistische Vorhersage über Feuchtwerte zu treffen und kann daher als Planungswerkzeug eingesetzt werden.

Welchen Einfluss haben Feuchteemissionen aus den Bauteilen auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?

Welchen Einfluss hat das Nutzerverhalten auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?

In Abschnitt 5.7.1 wird gezeigt, dass in der Simulation die Feuchteemissionen der Bauteile deutlich geringer sind als die Feuchteemissionen infolge der Nutzung. In den ersten Jahren der Nutzung ist die Emission von Bauteilen noch etwas stärker. Doch auch in diesem Zeitraum dominieren bereits die Feuchteinträge infolge von Personenanwesenheit, Wäsche waschen, Kochen etc.

Die Feuchteemissionen der Bauteile können aus dem Monitoring nicht direkt abgelesen werden. Es wurde jedoch in den Sommermonaten des Jahres 2020 eine gesonderte messtechnische Untersuchung in einer Wohnung vorgenommen, deren Auswertung nahelegt, dass die Simulation die Emissionen der Bauteile noch überschätzt (siehe Abschnitt 5.4). Auch das weist darauf hin, dass die Feuchteemissionen durch Nutzung weitaus größer sind als die Emissionen der Bauteile.

Welchen Einfluss hat das Außenklima auf das Schadensrisiko von feuchtebelasteten Souterrainwohnungen?

In sämtlichen Auswertungen der Raumklimamessungen wird sichtbar, dass das Raumklima durch das Außenklima stark beeinflusst wird. Insbesondere die absolute Luftfeuchte steigt im Sommer in allen Wohnungen an, wenn das Außenklima feuchter wird. Dies liegt einerseits daran, dass der Luftwechsel mittels Lüftungsanlagen, so wie auch bei konventioneller Fensterlüftung, ausschließlich mit unkonditionierter Außenluft erfolgt. Genauer gesagt, die Lüftungsanlagen haben bislang keinen Entfeuchter in der Frischluftansaugung installiert, sondern liefern die unkonditionierte Außenluft über einen Wärmetauscher direkt in die Raumluft. Dies kann vor allem in den Sommermonaten zu einer kurzzeitigen Befeuchtung der Raumluft führen, wenn der hygienische Luftwechsel ein Lüften erfordert.

Gleichzeitig besteht das Problem, dass bei einer geringen Feuchtedifferenz zwischen Raum- und Außenluft die Feuchteproduktion aus der Wohnung nicht ausreichend nach außen abgeführt werden kann. Die Folge ist eine Pufferung der produzierten Feuchtigkeit im Raum und somit ein Ansteigen der absoluten und in der Regel auch der relativen Raumluftfeuchtigkeit.

Bei der aktuellen Variante der Lüftungssteuerung ist somit ein direkter Zusammenhang zwischen Raumluftfeuchte und Außenklima vorhanden. Ein vorgeschaltetes Kühlregister, das die Außenluft bei Feuchtespitzen abkühlt, dadurch entfeuchtet und anschließend auf der Zuluftseite wieder erwärmt, könnte das Problem der sommerlichen Unbehaglichkeit und somit das Schadensrisiko temporär mindern.

6.2. Praxisrelevante Erkenntnisse des Projekts

Feuchtebelastung von Kellerwänden

Die Feuchtebelastung von Kellerwänden vor der Sanierung könnte mehr durch sommerliche Kondensation von Raumluftfeuchte als durch aufsteigende Feuchte geprägt sein. Darauf deuten – zumindest in den untersuchten Fällen – die Bohrmehlproben hin, bei denen der Durchfeuchtungsgrad von der Raumseite aus Richtung Mauerinneres abnahm. Die geringe Einwirkung aufsteigender Feuchte könnte dazu beigetragen haben, dass die untersuchten Fälle bislang schadensfrei geblieben sind: Nach erfolgter Sanierung und Inbetriebnahme der Lüftungssteuerung enden die sommerlichen raumluftseitigen Auffeuchtungszyklen, die – bei Abwesenheit aufsteigender Feuchte – vor der Sanierung die einzige relevante Feuchtequelle der Wände darstellten.

Das andere Extrem wäre eine vorwiegend aufsteigende Mauerfeuchte bei einem sehr gut durchlüfteten Keller. Dieses Beispiel wurde ebenfalls in den Bestandserhebungen dokumentiert. In diesem Fall sind deutliche horizontale Schichtungen des Feuchtegehalts feststellbar. Aufsteigende Mauerfeuchte verschlechtert sich in der Regel nach dem Aufbringen eines Wärmedämmverbundsystems auf die Fassade oder auch nach Installation einer dampfdichten Innendämmung aus Schaumglas. Beide Varianten konnten im Zuge der Bohrmehluntersuchungen in Gebäuden von Gassner & Partner festgestellt werden.

Abhängig vom Standort ist an Bestandsgebäuden in der Regel eine Mischung aus beiden Formen der Mauerfeuchte vorzufinden. Die in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Rasterfeuchtemessungen bieten eine einfache und ausreichend präzise Möglichkeit zur Erfassung der Mauerfeuchte.

Schimmelrisiko

1. Die Simulationen (siehe Abbildung 96, S. 117) wie auch die Messungen (siehe Beschreibung der Schadensfälle und der Raumklimamessungen) deuten darauf hin, dass Schimmel nicht zuerst am Putz auftritt, sondern vorher bereits an Einrichtungsgegenständen erkennbar ist. Bei diesen wiederum tritt der Schimmel am ehesten zunächst nicht direkt sichtbar an Rückseiten von Gegenständen auf (Unterseite Couch, siehe Fallbeispiel 3.3.4, S. 30, Hinterseite Einbauküche etc.).
2. Die Bewertung mit dem VTT-Schimmelmodell auf Basis der hygrothermischen Simulation als unkritischer Verlauf des Mould Index (Abbildung 96) deckt sich mit der Beobachtung schadensfreier Nutzungseinheiten, sofern sie mechanisch belüftet sind und ein entsprechender Putz eingesetzt wurde.

Feuchtemonitoring

Da die meisten Feuchteschäden zuerst an nicht sichtbaren Bauteiloberflächen, beispielsweise hinter Möbelstücken, auftreten, sollte ein sensorbasiertes Feuchtemonitoring gezielt an diesen abgeschirmten Bereichen eingesetzt werden. Die Auswahl an marktverfügbaren Lösungen für ein Feuchtemonitoring steigt, so werden Feuchtesensoren beispielsweise im Flachdachbereich zunehmend großflächig eingesetzt. Ein Feuchtemonitoring empfiehlt sich vor allem an den kritischen, repräsentativen Stellen. Wie oben erwähnt, sind das z.B. die Rückseiten von Gegenständen, die sich nahe an Außenwänden (Einbauküche, Einbaukasten etc.) oder nahe dem Fußboden befinden (Couch). Ein Monitoring kann vor allem in den Anfangsmonaten und ersten Jahren nach der erfolgten Sanierung

bzw. nach der Übergabe einer Wohnung an die Nutzer/innen hilfreich sein, zu hohe Feuchtwerte frühzeitig zu erkennen und somit einen Schaden zu vermeiden.

Lüftungsstrategie

1. Der normativ (ÖNORM H 6038) geforderte Grundluftwechsel ist bei Wohnungsnutzung grundsätzlich einzuhalten. Oft wird auf die Abfuhr von Emissionen aus Baustoffen hingewiesen, um einen Grundluftwechsel zu rechtfertigen. Im Bereich der vorgestellten Souterrain-/Gartenwohnungen hingegen steht die Feuchtebelastung infolge Nutzung und Bauteilemissionen im Vordergrund. Als Beispiel sei auf den Schadensfall 3.3.3, S. 30 referenziert, bei dem a) bei längerer Abwesenheit und b) bei abgedrehter Lüftung Schimmel an Einrichtungsgegenständen auftrat.
2. Der Entscheidungsbaum für die intelligente Lüftungssteuerung hat in mehrerlei Hinsicht noch Optimierungspotential. Sowohl die Ergebnisse der hygrothermischen Simulation und die darauf basierende Schimmelrisikobewertung als auch die Ergebnisse des Monitorings zeigen, dass die aktuell vorgesehenen Schwellenwerte nicht optimal sind und besser als Rampen mit Hysterese programmiert werden sollten. Der deutlich unkritische Mould Index zeigt, dass man nicht immer mit Maximalleistung lüften müsste, sobald die Außenluft Trocknungspotenzial aufweist. Damit könnte man elektrische Energie der Luftförderung und thermische Energie einsparen. Dies ist allerdings eine „ex post“-Aussage, also rückblickend nach erfolgter Simulation. Die Frage bleibt offen, wie man diese energiesparende Optimierung des Luftwechsels als prädiktive Regelung real umsetzen könnte.

Unsicherheiten und Fehlerrechnung

Insgesamt bestehen relativ große Unsicherheiten, vor allem bei den Inputparametern der Simulation. Diese betreffen vor allem

1. **Materialeigenschaften:** Es liegt beispielsweise eine große Streuung bei den Ergebnissen der Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Ziegel-Putz-Verbundproben vor, siehe Abbildung 78, S. 102. Ebenso ist zu erwarten, dass die Eigenschaften des Erdbodens, vor allem die Saugspannungskurven und Feuchtegehalte gemäß den unterschiedlichen Standorten und Bodenarten, deutlich unterschiedlich sein können.
2. **die Geometrie des Simulationsmodells:** Das Simulationsmodell wird als abgewinkelte Wandfläche dargestellt. Fenster- und Türleibungen werden zur Wandfläche hinzugerechnet, wodurch ein geometrischer Fehler auftritt. Dreidimensionale Wärmebrückensituationen gehen dadurch verloren. Diese Vorgangsweise bzw. diese Vereinfachung wurde aus rechentechnischen Gründen getroffen. Es wurde zwar mit einer Fehlerrechnung begonnen, deren Auswertung war jedoch zu komplex, um einen Nutzen für dieses Projekt erzielen zu können.
3. **das Nutzer:innen-Verhalten:** Die messtechnisch nur mit großem Aufwand erfassbare Fensterlüftung, die allenfalls zusätzlich zur mechanischen Lüftung erfolgt, wurde in diesem Projekt vernachlässigt. Bei der messtechnischen Kontrolle der intelligenten Lüftungssteuerung stellte sich heraus, dass die Nutzer:innen bei zu hohen CO₂-Werten in der Wohnung das Fenster öffneten oder bei einer zu hohen Geräuschentwicklung des Lüftungsgeräts die Lüftungsanlage deaktivierten.

4. **das Modell zur Schimmelpilzentwicklung:** Das VTT-Modell wurde bislang nur im Labor validiert und das auch nur für das Substrat Holz.
5. **der verwendete Außenklimadatensatz:** Es handelt sich um ein halbsynthetisches Außenklima, bestehend aus realen Messdaten des Jahres 2019 mehrerer Standorte. Der Datensatz enthält jedoch keine längeren durchgehenden Perioden mit feuchtwarmem Außenklima, das nur wenig Gelegenheit zur Entfeuchtung durch Lüften böte. Situationen mit dem erwähnten Zielkonflikt „hygienische Lüftung versus Entfeuchtung“ (siehe 4.5.4, S. 47) sind über das Jahr gesehen selten. Diese Annahme gilt es allerdings in Bezug auf aktuelle Modelle mit Prognosen zur langfristigen Klimaentwicklung zu überprüfen.
6. **die Stichprobengröße der Raumklimamessungen:** Die Raumklimamessungen wurden in acht ausgewählten Souterrain-/Gartenwohnungen aus vier Gebäuden durchgeführt. Eine größere Stichprobengröße könnte das Ergebnis noch absichern, jedoch war die Auswahl annähernd gleicher Wohnungen mit acht Stück begrenzt.

Die angesprochenen Einflüsse erschweren die Validierung der Simulation und erhöhen die Fehlermarge.

Vorschlag für den Ablauf der feuchtetechnischen Risikobewertung in der Praxis

Aus den Erkenntnissen des Projekts „space4free“ und der Erfahrung des Projektpartners Gassner & Partner kann folgender Vorschlag für einen groben Ablauf einer Sanierungsplanung eines Gründerzeitkellers mit Umwidmung zur Wohnungsnutzung abgeleitet werden:

1. Überschlägige Identifikation der feuchtebezogenen kritischen Stellen in der Nutzungseinheit durch
 - mehrmonatige, im Idealfall mehrjährige Bauzustandsanalyse mit Messungen der Oberflächentemperaturen, der Raumlufttemperatur sowie der Raumluftfeuchte.
 - grobe Einschätzung/Einteilung des Bestandskellers auf Basis einschlägiger Erfahrungen: Wie ist die Ausrichtung der Kellerwände nach der Wetterseite oder gibt es geschützte hofseitige Lagen? Wie tief liegt der Keller unter dem Außenniveau? Hier könnte eine Unterscheidung nach Halb- oder Vollkeller erfolgen. Gibt es nicht unterkellerte Bereiche, die eine Durchfeuchtung des Erdgeschoßes hervorrufen könnten?
2. Bauwerksdiagnose in Form von Bohrprobenentnahmen: Die Probenentnahmestellen werden auf Basis des Monitorings und der überschlägigen Identifikation kritischer Stellen gewählt. Ziel ist einerseits, den aktuellen Feuchtezustand des Mauerwerks zu erkunden und andererseits, plausible Annahmen für eine mögliche hygrothermische Simulation zu erhalten. Eine wesentliche Erkenntnis könnte sein, ob aufsteigende Feuchte vorliegt oder ob die Durchfeuchtung des Mauerwerks auf Kondensation von Raumluftfeuchte zurückzuführen ist.
3. Abschätzung der Feuchtelast über eine grobe Bilanzierung: Durch Gegenüberstellung der erwarteten Feuchteproduktion aus der Nutzung, der Feuchtelast aus den Bauteilen sowie der Feuchteabfuhr mittels Lüftungsanlage kann eine grobe Abschätzung der Feuchtebilanz erfolgen. Die Ergebnisse und Annahmen aus dem Projekt bilden die Grundlage für diese.
4. Hygrothermische zweidimensionale Bauteilsimulation:
 - Eine Auswertung kritischer Bauteilstellen gemäß den Vorgaben aus dem Projekt „space4free“ liefert eine Planungsgrundlage zur Abschätzung des Schadensrisikos. Eine

kritische Bauteilstelle könnte beispielsweise der Fußbodenanschluss zu einer erdberührten Außenwand sein.

- Als Feuchteeintrag infolge der Wohnungsnutzung können die Luftfeuchteklassen gemäß ÖNORM EN ISO 13788 angenommen werden. Die Luftfeuchteklassen 3 bis 4 geben Werte auf der sicheren Seite an. In der Nutzung ist jedenfalls eine Feuchtelast gemäß Luftfeuchtklasse 2 anzustreben.
 - In Übereinstimmung mit den Vorgaben der ÖNORM B 8110-2:2020, Abschnitt 10, sollte eine hygrothermische Simulation der kritischen Stellen mit einem Programm, das nach ÖNORM EN 15026 validiert ist, durchgeführt werden. Die Beurteilung des Schimmelrisikos kann nach dem VTT-Modell erfolgen. Eine reine Beurteilung der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit der Zeitdauer an den Bauteiloberflächen liefert eine akzeptable Grundlage zur Einschätzung des Schadensrisikos.
 - Eventuell kann eine Variation der Feuchtelast die Bandbreite des Schadensrisikos angeben. Das Ziel hygrothermischer Simulationen ist nicht, einen Grenzwert für bestimmte Parameter festzulegen, sondern nach einem probabilistischen Ansatz das Risiko in Abhängigkeit bestimmter Maßnahmen zu beurteilen.
 - Anhand einer Sanierungsplanung werden die Maßnahmen und das Schadensrisiko dokumentiert bzw. gegenübergestellt.
5. Fertigstellung der Sanierungsarbeiten: Im Bauablauf der Sanierung sollte berücksichtigt werden, dass durch verschiedenste Maßnahmen teilweise massive Feuchteinträge in die Bauteile entstehen. Diese Baufeuchte braucht in der Regel mehrere Monate – in Ausnahmefällen sogar Jahre – um austrocknen zu können. Es ist daher notwendig, in den ersten Monaten nach dem Bezug einer Souterrain-/Gartenwohnung stärker zu lüften oder eine aktive Entfeuchtung vorzunehmen. Unterstützend wirkt dabei der Übergabezeitpunkt einer fertiggestellten Wohnung an die Nutzer:innen. So ist es zielführend, eine Wohnungsübergabe im Herbst oder Winter durchzuführen, um mittels Lüftung mit der Außenluft eine Trocknung der Raumluft bzw. eine Abfuhr der nutzungsbedingten Feuchteproduktion zu ermöglichen. Wohnungsübergaben im späten Frühling sowie im Hochsommer sind dementsprechend nachteilig, weil zu dieser Jahreszeit nur verminderte Lüftungsmöglichkeiten bestehen. In diesem Fall ist eine aktive Entfeuchtung vorzusehen.

7 Ausblick und Empfehlungen

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass der Ausbau von ungenutzten Kellerflächen zu Gartenwohnungen mit angenehmem Raumklima und begrüntem Innenhof ein großes Potential bietet, vor allem im Zusammenhang mit der innerstädtischen Nachverdichtung. Umgesetzte Projekte von Gassner & Partner und Ulreich Bauträger belegen, dass die Sanierungskonzepte sowie die technischen Lösungen zu langfristig schadensfreien Wohnungen führen. Dennoch könnte für Unternehmen in der Praxis, die noch nicht derartige Erfahrungswerte in der Sanierung sammeln konnten, ein Planungstool oder ein Planungsleitfaden von Interesse und Nutzen sein.

7.1. Optimierung der Simulationsmethodik

Die Simulation wurde mit HAM4D_VIE durchgeführt. Dieses Programm eignet sich vor allem für die Simulation von einzelnen Bauteilen und Details von Bauteilanschlüssen. Für die Simulation der Souterrainzone mussten daher einige geometrische Vereinfachungen (vor allem die abgewinkelte Modellierung) durchgeführt werden (siehe Abschnitt 4.6.2), um die erforderliche Rechenzeit in einem akzeptablen Rahmen zu halten. Es wurde angenommen, dass die mit diesen Vereinfachungen einhergehenden Fehler für die Beantwortung der Forschungsfragen vernachlässigbar klein sind. Es wurden bereits Untersuchungen gestartet, um die Größenordnung des Fehlers quantifizieren zu können. Diese Untersuchungen sind allerdings aufgrund ihrer Komplexität und der bereits angesprochenen langen Rechenzeit der Modelle zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Dokuments noch nicht abgeschlossen.

Eine vollständige dreidimensionale Simulation der Souterrainzone, die auf diese Vereinfachungen nicht angewiesen ist, wäre in jedem Fall wünschenswert. Dies hätte einige Vorteile:

- zusätzliche Informationen (z.B. Angaben zur Feuchte in Bezug auf einzelne Räume in der Zone)
- keine Vereinfachung durch eine abgewinkelte Modellierung der Bauteile und kein damit einhergehender Modellierungsfehler
- Analysemöglichkeiten von dreidimensionalen Bauteilanschlüssen

Dies würde jedoch die geometrische Komplexität des Simulationsmodells um ein Vielfaches vergrößern. Um eine derartige Simulation mit HAM4D_VIE durchführen zu können, bedarf es einer Weiterentwicklung des Programms im Bereich der Rechenleistung. Dies kann durch Verbesserung der Single-Thread-Performance und durch Parallelisierung (Nutzung von Multicore CPUs, GPUs oder Rechner-Clustern) erfolgen. Außerdem wäre eine Überarbeitung der Geometrieingabe erforderlich, da diese momentan textbasiert ist, was bei einer dreidimensionalen Modellierung mit hohem Aufwand verbunden ist.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Entwicklung eines neuen Programms, beispielsweise mit Nutzung von Open-Source-Rechenkernen wie NGSolve. Dies würde den Vorteil mit sich bringen, dass die Finite-Elemente-Methode genutzt werden könnte, die gegenüber der Finite-Volumen-Methode ein weitaus gröberes Mesh (Zerlegung des Modells in Volumenelemente) bei gleicher Rechengenauigkeit erlaubt. Dadurch wäre eine deutliche Verbesserung der Rechenzeit zu erwarten. Darüber hinaus arbeiten diese Rechenkern üblicherweise parallelisiert, wodurch eine hohe Rechenleistung erzielt wird. Ein erhebliches Hindernis könnte jedoch die Finite-Elemente-Implementierung von Flüssigwasserleitung

in porösen Stoffen darstellen, da dieser eine nichtlineare partielle Differentialgleichung zugrunde liegt. Flüssigwassertransport stellt für die hygrothermische Bauteilsimulation ein bedeutendes Phänomen dar.

7.2. Weiterentwicklung des Lüftungsalgorithmus

Der bestehende Lüftungsalgorithmus stellt einen Prototyp dar, der in der Praxisanwendung bereits einige Fehler und nicht zielführende Lüftungssituationen gezeigt hat. Das Hauptproblem beim erstmaligen Test praxisnaher Anwendungen ist, dass die Regelung aufgrund vieler Einflussgrößen und Parameter unter einem realen Nutzer:innen-Verhalten nur eingeschränkt überprüft werden kann. Ein Test in einer Klimakammer, wo ein künstliches Nutzer:innen-Verhalten simuliert wird, wäre eine optimale Methode zum Testen eines Prototyps. Der Regelalgorithmus berücksichtigt nicht alle möglichen Parameter, es müssen teilweise Annahmen getroffen werden, weil Daten nicht in ausreichender Größe oder Genauigkeit vorhanden sind, und es müssen die „richtigen“ Daten und Messwerte für eine zielführende Entscheidung der Regelung zur Verfügung stehen. In diesem Kontext ist die Positionierung von Sensorik eine wesentliche Grundlage. Während der Projektlaufzeit traten immer wieder unplausible Messdatenauswertungen auf, die auf eine nicht korrekte Positionierung eines Sensors oder schlichtweg einen Messfehler zurückzuführen waren.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Überarbeitung der Programmierung hinsichtlich der Hysterese von Schwellenwerten. Ziel einer Version 2 des Regelalgorithmus ist, die Schwellenwerte durch eine Programmierung von „Rampen“ zu ersetzen. Dadurch wird beispielsweise vermieden, dass die Lüftungsanlage beim Überschreiten eines CO₂-Wertes von 1000 ppm sofort auf Volllast umschaltet. Eine gleitende Steigerung des Luftvolumenstroms ist in diesem Fall zielführender. Ähnliches gilt für die Überwachung der Feuchtelast und der Temperatur.

7.3. Umsetzung als Demonstrationsprojekt

Der Lüftungsalgorithmus wurde als Prototyp entwickelt und in einer Wohnung von Gassner & Partner unter einem bestimmten Nutzer:innen-Verhalten getestet. Im Zuge der Auswertungen zeigte sich, dass eine Überarbeitung der Programmierung und der Regelung erforderlich sein wird.

Um die intelligente Lüftungssteuerung einem breiten Anwendungstest zu unterziehen, wäre ein Demonstrationsprojekt mit drei bis fünf annähernd gleichen Souterrain-/Gartenwohnungen, die jedoch ein unterschiedliches Nutzer:innen-Verhalten aufweisen, zielführend. Bei gleichen Außenklimarandbedingungen, identer Bauweise sowie annähernd identen Bodenrandbedingungen bleibt als variable Randbedingung nur das Nutzer:innen-Verhalten übrig. Dadurch wäre eine Demonstration der langfristigen Funktionstüchtigkeit der intelligenten Lüftungssteuerung in Abhängigkeit des Nutzer:innen-Verhaltens möglich.

7.4. Weitere offene Forschungsthemen stichwortartig aufgelistet

- Lüftung bei Urlaub: Dieser Nutzungszustand wurde weder in den Simulationen betrachtet noch in den Raumklimamessungen detailliert ausgewertet. Die Frage, welche Grundlüftung erforderlich ist, wenn Wohnungsnutzer:innen auf Urlaub fahren und die Wohnung leer steht, wurde in diesem Projekt nicht beantwortet.
- Nicht eingeschwungener Zustand: Die Simulationen wurden im eingeschwungenen Zustand ausgewertet. Aufgrund der Anfangsbedingungen ergeben sich in den ersten drei Jahren der Simulation deutlich andere Daten als im eingeschwungenen Zustand. Somit könnte infolge Baufeuchte oder Wohnungsleerstand das Schadensrisiko direkt nach Fertigstellung der Sanierung am größten sein.
- Bodenuntersuchungen: Welche Auswirkungen haben die Bodenbeschaffenheit, speziell die Flüssigkeitsleitung im Boden, sowie der Feuchteübergang zwischen Boden und Mauerwerk auf das Simulationsergebnis? Wie kann die Bodenfeuchte realistisch in der Simulation abgebildet werden?
- Wie wirkt sich eine Innendämmung (diffusionsoffen oder diffusionsdicht) auf das Raumklima und die Bauteilfeuchte in einer Souterrain-/Gartenwohnung aus?
- Verschiedene Anstriche: Anstriche an den Bauteiloberflächen wurden vernachlässigt. Es wurde angenommen, dass alle verwendeten Anstriche mineralischen Ursprungs und vollkommen diffusionsoffen sind.
- Fehlerrechnung: Auswirkung der Modellvereinfachung infolge der abgewickelten Darstellung
- Untersuchung unterschiedlicher Luftführungskonzepte
- Offene Punkte zur Simulation sowie zur Modellierungsoptimierung in HAM4D_VIE:
 - o Verbesserung der Modellierung des Flüssigwassertransports, um einerseits Rechenzeit einzusparen und andererseits eine feinere Gitterstruktur und somit eine höhere Genauigkeit vor allem bei der Modellierung von dreidimensionalen Problemstellungen zu erhalten.
 - o Berücksichtigung von kapillaren Widerständen an Schichtgrenzen, vor allem die Lagerfugen der Ziegel. Eventuell sollte ein Meta-Modell entwickelt werden, das den Baustoff Mauerwerk ideal abbildet.
 - o Berücksichtigung der unterschiedlichen Bodenfeuchten im Wiener Boden
 - o Messung der Dampfdiffusionswiderstandszahl des Diffupor®-Putzes anstelle der Ermittlung durch Curve-Fitting aus dem Vergleich des Trocknungsversuchs mit der Simulation
- Untersuchung der Wirkung eines Feuchteanzeigergeräts (Empfehlung ÖN 8110-2:2020 bzw. Beiblatt 4) auf das Lüftungsverhalten und damit auf das Feuchteregime in den Wohnungen. Wie groß wäre der Abstand im Feuchteregime zu einer Situation mit mechanischer Lüftung, wenn man auf Fensterlüftung und ein gutes Anzeigergerät für die relative Raumluftfeuchte

setzte? Der Einsatz eines Anzeigegeräts wird im Beiblatt 4 aus dem Jahr 2003¹ der ÖN B 8110-2 empfohlen und in der ÖNORM B 8110-2:2020, je nach Interpretation, „zur Sicherung der Innenluftbedingungen“ sogar vorgeschrieben.

¹ Zitat aus dem Beiblatt 4: *„Da Menschen über keine Sinnesorgane für die Wahrnehmung der Luftfeuchtigkeit verfügen (und keine Unterscheidung zwischen wohnbedingter und baubedingter Feuchtigkeit vornehmen können), ist eine bewusste Feuchtigkeitskontrolle (z.B. durch Beobachtung eines Anzeigegerätes wie z.B. eines Hygrometers) angezeigt.“*

8 Verzeichnisse

8.1. Literatur

- ASP 20 Silje Kathrin Asphaug, Tore Kvande, Berit Time, Ruut H. Peuhkuri, Targo Kalamees, Pär Johansson, Umberto Berardi und Jardar Lohne (2020). *Moisture control strategies of habitable basements in cold climates*. In: *Building and Environment* 169
- BED 00 Thomas Bednar (2000). *Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren*. Diss.
- BPH 17 Markus Hofmann, Christoph Geyer und Oliver Kornadt (2017). *Bemessung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle auf der Grundlage von Raumklimamessungen*. In: *Bauphysikkalender 2017* Hrsg. von Nabil A. Fouad, S. 577–601
- DES 97 Filip Descamps (1997). *Continuum and discrete modelling of isothermal water and air flow in porous media*. Diss.
- DIF 21 Produktbeschreibung Diffupor® Feuchtmauerputz
<https://www.diffupor.at>
letzter Zugriff: 15.9.2021
- EBE 15 Endbericht HdZ:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/sanierung-gruenderzeitgebaeude-eberlgasse-auf-passivhausstandard.php>
letzter Zugriff: 6.9.2021
- ENE 12 Zeno Bastian u. a. (2012). *EnerPHit-Planerhandbuch*. Passivhausinstitut. url:
http://www.passiv.de/de/03_zertifizierung/02_zertifizierung_gebaeude/04_enerphit/04_enerphit-planer-hb.htm
- GEO 21 Österreichische Radonkarte: https://geogis.ages.at/GEOGIS_RADON.html
letzter Zugriff: 8.11.2021
- GRA 17 Klodian Gradeci, Nathalie Labonnote, Berit Time und Jochen Köhler (2017). *A probabilistic-based approach for predicting mould growth in timber building envelopes: Comparison of three mould models*. In: *Energy Procedia* 132, S. 393–398
- HAN 19 Thor Hansen (2019). *Vapour barrier in cold ventilated attics: The use of vapour barriers in ceilings against cold ventilated attics, with different amounts and types of insulation materials*. Aalborg Universitetsforlag. Ph.d.-serien for Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet
- HOL 01 Andreas H. Holm (2001). *Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes (Dissertation)*
- HUK 99 A. Hukka und H. A. Viitanen (1999). *A mathematical model of mould growth on wooden material*. In: *Wood Science and Technology* 33
- IEA 15 Endbericht IEA Annex 55:
<https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=55>
letzter Zugriff: 7.9.2021
- KRI 63 O. Krischer und K. Kröll (1963). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

- KRU 09 Krus, M., Sedlbauer, *Einfluß von Ecken und Möblierung auf die Schimmelpilzgefahr*, K., Künzel (Hg.), *Wohnungslüftung und Raumklima* (2009), S. 226-230
- KRU 95 Martin Krus (1995). *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken*. Diss. Stuttgart
- LEU 51 Leusden, F.; Freymark, H.: *Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch*. In: *Gesundheitsingenieur* 72 (1951) Heft 16, S. 271-273
- MAS 21 MASEA Datenbank und Materialdatensammlung
<https://www.masea-ensan.de/>
letzter Zugriff: 7.11.2021
- MEI 21 Hermann Meier und Sylvia Stürmer (2021). *Sanierputzsysteme: Planung, Ausführung, Fehlervermeidung*. Fraunhofer IRB. isbn: 3738805079
- MET 21 Wetterdaten für das halbsynthetische Außenklima
<https://meteo.boku.ac.at/wetter/aktuell/index.html>
letzter Zugriff: 16.10.2021
- MOI 21 Produktbeschreibung und technische Daten zu Moist350B
<http://www.hf-sensor.de/deutsch/moist350b.html>
letzter Zugriff: 16.10.2021
- NMR 95 Wolf-Dietrich Herzog und Michael Messerschmidt (1995). *NMR-Spektroskopie für Anwender*. 4. Aufl. VCH
- NOW 96 Siegfried Nowotny und Helmut E. Feustel (1996). *Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung Grundlagen und Berechnungsmodelle*. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin
- OJA 11 Tuomo Ojanen, Ruut Peuhkuri, Hannu Viitanen, Kimmo Lähdesmäki, Juha Vinha und Kati Salminen (2011). *Classification of material sensitivity – New approach for mould growth modeling*. In: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*
- PAU 14 Eberhard Paul, Ehrenfried Heinz und Thomas Hartmann (2014). *Lüftung in Wohngebäuden Planung und Umsetzung nach DIN 1946-6*. Forum Verlag Herkert GmbH
- PET 58 Max von Pettenkofer (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. url:
<https://download.digitale-sammlungen.de/pdf/16348230638888bsb10767804.pdf>
(besucht am 21. 10. 2021)
- PSE 21 Vorschau auf den FWF Endbericht:
http://www.stadtebau.at/wp-content/uploads/2020/08/FWF-Final-Project-Report_Psenner_V475-G27.pdf
letzter Zugriff: 13.9.2021
- REC 05 Recknagel H., *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, 72. Auflage, Schramek E. (Hg.), Oldenbourg Industrieverlag München 2005
- REI 96 Friedrich Reinmuth (1996). *Raumlufttechnik*. Vogel Buchverlag
- RIB 20 Andra Blumberga u. a. (Juni 2020). *Written guidelines for decision making concerning the possible use of internal insulation in historic buildings (report of the EU project RIBuild)*
- RIE 08 Klaus Fitzner u. a. (2008). *Rietschel, Raumklimatechnik Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik*. Hrsg. von Klaus Fitzner. 16. Aufl. Verlag für Bauwesen Berlin
- SAR 19 Andreas Sarkany (Nov. 2019). *Von der hygrothermischen Bauteilsimulation zur Einschätzung des Risikos eines Feuchteschadens — Implementierung der Berechnung des MouldIndex in HAM4D_VIE*. Magisterarb.

- SCH 09 Schild, P.G., Mysen, M., *Recommendations on Specific Fan Power and Fan System Efficiency*, International Energy Agency, Technical Note AIVC 65, 2009
- SCH 19 Peter Tappler u. a. (2019). *Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden*. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
- SCO 57 W. J. Scott (1957). *Water Relations of Food Spoilage Microorganisms*. In: *Advances in Food Research* 7, S. 83–127.
- SIB 13 E. Sibille, G. Rojas-Kopeinig, M. Rothbacher, R. Pfluger und H. K. Malzer (2013). *Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten "Doppelnutzen" Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung*. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Haus der Zukunft. Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
- STA 86 Georg Staufenbiel und Josef Wessig (1986). *Bauphysik und Baustofflehre, eine Einführung in Experimenten – Adhäsion, Porigkeit, Kapillarität*. Bd. 1. Bauverlag GmbH
- VER 12 Evy Vereecken und Staf Roels (2012). *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*. In: *Building and Environment* 51, S. 296–310
- VII 07 Hannu Viitanen und Tuomo Ojanen (2007). *Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials*. url: https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2007%20B10%20papers/162_Viitanen.pdf
- VRA 21 Marina Vranić (Mai 2021). *Trocknungsverhalten von Heizstrichen nach Belagsverlegung*. Magisterarb.
- WHO 09 World Health Organization (2009). *Who Guidelines For Indoor Air Quality*
- WIE 15 Magistrat der Stadt Wien, MA 23 – Wirtschaft, Arbeit und Statistik (Hrsg.): *Wien im Querschnitt der Zeit, Statistik Journal 2/2015, Ergebnisse aus der Registerzählung 2011; Gebäude- und Wohnungszählung; Grafik S.34*
- WIS 10 Endbericht HdZ:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/gruenderzeit-mit-zukunft-demonstrationsprojekt-2-roofjet-wissgrillgasse-innovative-modernisierung-eines-gruenderzeithauses.php>
letzter Zugriff: 6.9.2021
- ZEL 17 Thomas Zelger, Hildegund Figl, Astrid Scharnhorst, Bernhard Lipp, Tobias Waltjen, Thomas Bednar, Paul Wegerer, Johann Schwaller, Jürgen Obermayer, Michael Steinbrecher, Martin Wölfl und Martin Ploss (2017). *Passivhaus-Bauteilkatalog: Sanierung Ökologisch bewertete Konstruktionen*. Hrsg. von IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. Birkhäuser

8.2. Normen

| | |
|--------------------|--|
| DIN 1946-6-5 | <i>DIN 1946-6:2015 Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung; Beiblatt 5: Kellerlüftung (Dez. 2015)</i> |
| DIN EN 1015-19 | Deutsches Institut für Normung e. V. (Jan. 2005). <i>DIN EN 1015-19 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 19: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Festmörteln aus Putzmörteln</i> |
| DIN EN ISO 12572 | Deutsches Institut für Normung e. V. (Mai 2017). <i>DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß</i> |
| DIN EN ISO 1514 | Deutsches Institut für Normung e. V. (Dez. 2018). <i>DIN EN ISO 15148 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen</i> |
| DIN FB 4108-8 | DIN Fachbericht 4108-8:2010-09, <i>Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden</i> |
| EN 16798-1 | Deutsches Institut für Normung e. V. (2021). <i>DIN EN 16798-1 Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik</i> |
| ÖNORM EN 15026 | ÖNORM EN 15026:2007-06-01, <i>Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation</i> |
| ÖNORM B 3355 | ÖNORM B 3355: 2017-03-01, <i>Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk – Bauwerksdiagnose, Planungsgrundlagen, Ausführungen und Überwachung</i> |
| ÖNORM B 8110-2 | ÖNORM B 8110-2:2020-01-01, <i>Wärmeschutz im Hochbau, Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz; Österreichisches Normungsinstitut 2020.</i> |
| ÖNORM EN ISO 13788 | ÖNORM EN ISO 13788:2013-04-01, <i>Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren; Österreichisches Normungsinstitut 2013.</i> |
| ÖNORM EN ISO 7730 | ÖNORM EN ISO 7730:2006, <i>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</i> |
| ÖNORM H 6038 | Österreichisches Normungsinstitut (2020). <i>ÖNORM H 6038: Lüftungstechnische Anlagen – Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung Planung, Ausführung, Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung</i> |

8.3. Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Gebäudebestand in Wien der Bauperiode vor 1919 aus dem Statistik Journal 2015 der Stadt Wien [WIE 15] | 15 |
| Abbildung 2: Fensteröffnung eines originalen, nicht sanierten Gründerzeitkellers (links); Fenstergitter mit Verschießmöglichkeit (rechts) | 17 |
| Abbildung 3: Massive Salzausblühungen bei unsaniertem Mauerwerk (links); nicht genutzter Keller mit unverputzten Ziegelwänden (rechts)..... | 18 |
| Abbildung 4: Sanierter Lagerkeller am Beispiel des Objekts Leystraße 81 | 19 |
| Abbildung 5: Gemessene Außen- und Raumlufttemperatur am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt; | 20 |
| Abbildung 6: Gemessene relative Außen- und Raumluftfeuchtigkeit am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt;..... | 21 |
| Abbildung 7: Gemessene absolute Außen- und Raumluftfeuchtigkeit am Standort Neilreichgasse 3-5 im Jahr 2019; es werden Tages- und gleitende Wochenmittelwerte dargestellt;..... | 21 |
| Abbildung 8: Auszug aus der ÖNORM B 3355: 2017-03-01; Anwendung von Vertikal- und Horizontalabdichtungen bei erdberührtem sowie freistehendem Mauerwerk | 22 |
| Abbildung 9: Querschnitt durch ein Gründerzeithaus vor der Sanierung (Originalplan, oben) und nach der Sanierung mit abgesenktem Hofniveau (Polierplan Gassner & Partner, unten) | 24 |
| Abbildung 10: Absenkung des Hofniveaus und Öffnung der Kellerfenster bis zum Kellerboden am Beispiel Erlgasse 38; Fotos: Baustellendokumentation Gassner & Partner | 24 |
| Abbildung 11: Kellergrundriss des Objekts Neilreichgasse 3-5; die Wohnbereiche und der Parteienkeller sind markiert. (Polierplan Gassner & Partner)..... | 25 |
| Abbildung 12: Gebäudeschnitt mit Bezeichnung der Sanierungsmaßnahmen im Bereich des Lagerkellers und der Souterrainwohnung; Polierplan Gassner & Partner | 26 |
| Abbildung 13: Feuchteschäden am erdberührten Mauerwerk infolge Salzausblühungen | 27 |
| Abbildung 14: Kellermauerwerk ohne Verputz mit Wandtemperierung (links); fertige Sanierung mit Lüftungsleitung (rechts) | 27 |
| Abbildung 15: Souterrain mit Büronutzung und Stiege zum Erdgeschoß..... | 28 |
| Abbildung 16: Gemessener Temperaturverlauf im Erdgeschoß, im Kellergeschoß und in der Bauteilecke Wand/Fußboden..... | 29 |
| Abbildung 17: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit im Erdgeschoß, im Kellergeschoß und in der Bauteilecke Wand/Fußboden..... | 29 |
| Abbildung 18: Schimmelpilzbildung an der Unterseite einer Couch infolge erhöhter Raumluftfeuchte, geringer Konvektion und kalter Bauteile..... | 30 |
| Abbildung 19: Gemessene Temperatur (oben) und gemessene relative Luftfeuchtigkeit (unten) der Raumluft an den Positionen in Raummitte, unter der Couch sowie hinter der Couch in der Ecke des Boden-Wand-Anschlusses; in der Messung sind Winter- und Sommerzustand erkennbar; es sind Tagesmittelwerte dargestellt. | 31 |
| Abbildung 20: Einordnung des gemessenen Raumklimas in Luftfeuchteklassen gem. EN ISO 13788; das Raumklima entspricht der Klasse 4, was gem. Norm einer Nutzung als „Schwimmbad“ entspricht ... | 32 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 21: Verlauf von gemessener Temperatur und gemessener relativer Luftfeuchtigkeit der Raumluft über zwei Sommerperioden mit Markierung der kritischen Marke von 80% relativer Luftfeuchtigkeit; es sind Tagesmittelwerte dargestellt..... | 33 |
| Abbildung 22: Schimmelpilzbildung an der Wandoberfläche des Kellergeschoßes im Bereich der Feuermauer | 34 |
| Abbildung 23: Schnitt durch die Maisonettewohnung mit Markierung der Sensorpositionen (gelb – Raumluft WZ, blau – Luft unter Küchenbank) analog zu den Auswertungen in Abbildung 24..... | 34 |
| Abbildung 24: Temperatur (oben) und relative Luftfeuchtigkeit (unten)..... | 35 |
| Abbildung 25: Querschnitt durch eine Kelleraußenwand mit Markierung der Bohrmehlentnahmestellen (links); beispielhafte Auswertung der Mauerwerksuntersuchung am Objekt Neilreichgasse mit Durchfeuchtungsgrad und Salzbelastung (blau markiert) | 38 |
| Abbildung 26: Feuchtemessgerät Moist 350 B zur Bestimmung der Bauteilfeuchte mittels Mikrowellentechnologie | 39 |
| Abbildung 27: I2C-Kombisensor (HYT939) zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit; hier beispielhaft dargestellt an einer Wandoberfläche mit Grobputz; Situation vor der Montage der Innendämmung am Objekt A | 40 |
| Abbildung 28: Plandarstellung der Wohneinheit..... | 51 |
| Abbildung 29: Links – gewinkeltes Bauteil, rechts – abgewickelte Darstellung; die der Wohneinheit zugewandte Fläche bleibt unverändert. | 52 |
| Abbildung 30: Querschnitte des abgewickelten Modells in der Simulationsumgebung; links – straßenseitige Wand mit erhöhtem Gehsteigniveau, Mitte – tragende Innenwand; rechts: hofseitige Wand | 53 |
| Abbildung 31: Verlauf der für das Auskeimen von Sporen (= Schimmel-Wachstumsbeginn) kritische Feuchte über der Temperatur. Quelle: [HUK 99]..... | 56 |
| Abbildung 32: Temperatur- und Feuchteverlauf der halbsynthetischen Außenklimarandbedingung bestehend aus realen Messdaten der Standorte Neilreichgasse und Erlgasse | 61 |
| Abbildung 33: Simulationsmodell zur Bestimmung der Bodentemperatur in 4,8 m Tiefe unter dem Gehsteigniveau bzw. in 2,4 m Tiefe unter dem Gartenbereich; die ermittelte Temperaturverteilung wird als Bodenrandbedingung im hygrothermischen Bauteilmodell angesetzt..... | 63 |
| Abbildung 34: Temperaturverlauf über ein Jahr in den einzelnen Bodenschichten zwischen der Bodenoberfläche und 4,8 m Tiefe; der Zeitpunkt 0 entspricht dem 1. Jänner um 0 Uhr des Simulationsjahres | 64 |
| Abbildung 35: Simulationsmodell zur empirischen Bestimmung der Saugspannung an der Bodenrandbedingung (links); Farb- und Zahlenskala des Wassergehalts in kg/m ² , bezogen auf den Querschnitt des Modells | 65 |
| Abbildung 36: Verteilung des Wassergehalts im quasistationären Zustand bei einer Saugspannung von 10 kPa (links) und 25 kPa (rechts) an der Bodenrandbedingung | 65 |
| Abbildung 37: Verteilung des Wassergehalts im quasistationären Zustand bei einer Saugspannung von 35 kPa (links) und 50 kPa (rechts) an der Bodenrandbedingung | 66 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 38: Festsetzung der Anfangsbedingungen für den Wassergehalt des Bodens und des Mauerwerks, basierend auf den Testsimulationen; es ist der eingeschwungene Zustand nach 70 Jahren dargestellt..... | 67 |
| Abbildung 39: Temperaturfeld im Kernwinter (31.12., 23 Uhr) im Querschnitt eines unsanierten Gründerzeitkellers bei Variation des Luftwechsels von 0,01 bis 4,0 pro Stunde..... | 68 |
| Abbildung 40: Lufttemperatur als gleitender Wochenmittelwert in einem unsanierten Gründerzeitkeller bei Variation des Luftwechsels (LW) von 0,01 bis 4 pro Stunde..... | 69 |
| Abbildung 41: Simulationsmodell zur Bestimmung der Wärmeverluste durch die Kellerdecke und die Außenwand | 70 |
| Abbildung 42: Wärmestrom durch die Kellerdecke als gleitender Wochenmittelwert bei Variation des Luftwechsels (LW) von 0,01 bis 4 pro Stunde | 70 |
| Abbildung 43: Wärmestromdichte bzw. spezifischer Wärmestrom durch die Kellerdecke in Abhängigkeit des Luftwechsels der Kellerraumluft..... | 71 |
| Abbildung 44: Zustand des Kellers bei der Probenentnahme..... | 73 |
| Abbildung 45: Grundriss des Kellers Neilreichgasse 3-5 mit Markierungen der Probeentnahmestellen | 73 |
| Abbildung 46: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben der straßenseitigen Entnahmestellen untergliedert nach Probenstelle unten (u)/Mitte (m)/oben (o) | 74 |
| Abbildung 47: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an der Feuermauer (F), an der Hofmauer (H) und an der Mittelmauer (M) untergliedert nach Probenstelle unten (u)/Mitte (m)/oben (o)..... | 74 |
| Abbildung 48: Mittelwerte und Standardabweichungen der Feuchtegehalte aller Messstellen je Bauteil sowie in Abhängigkeit der Lage und der Probentiefe..... | 75 |
| Abbildung 49: Grundriss der Souterrain-/Gartenwohnung Ergasse 38, Top 1c mit den Markierungen der Probenentnahmestellen | 77 |
| Abbildung 50: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an den straßenseitigen Messstellen vor dem Baustart im Jahr 2016 und drei Jahre nach der Gebäudefertigstellung im Jahr 2020..... | 78 |
| Abbildung 51: Feuchtegehalt der Bohrmehlproben an den hofseitigen Messstellen vor dem Baustart im Jahr 2016 und drei Jahre nach der Gebäudefertigstellung im Jahr 2020..... | 78 |
| Abbildung 52: Grundriss des Kellergeschoßes des Gebäudes Fröbelgasse 6 mit Markierung der Messfelder..... | 79 |
| Abbildung 53: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 1 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts) | 80 |
| Abbildung 54: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 2 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts) | 81 |
| Abbildung 55: Feuchtegehalt der Mauerziegel im Messfeld 3 in einer Tiefe bis 30 cm (links) und in einer Tiefe bis 5 cm (rechts) | 82 |
| Abbildung 56: Klimaverhältnisse (Temperatur in blau und grau sowie relative Luftfeuchtigkeit in gelb und orange) in einem nicht sanierten Keller eines Gründerzeithauses bei unkontrollierter Durchlüftung sowie das Außenklima als Referenz..... | 83 |
| Abbildung 57: Einteilung der Raumklimadaten aller Messobjekte in die Luftfeuchteklassen gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) | |

| | |
|---|----|
| dargestellt; es ist zu erkennen, dass bis auf zwei abweichende Objekte alle untersuchten Wohnungen in die Luftfeuchtekategorie 2 fallen und somit einer typischen Wohnungsnutzung entsprechen. | 84 |
| Abbildung 58: Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur aller Messobjekte gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) dargestellt; es ist zu erkennen, dass die Raumlufttemperatur in allen untersuchten Wohnungen über das gesamte Jahr annähernd konstant ist; | 84 |
| Abbildung 59: Verhältnis zwischen Außenlufttemperatur und relativer Innenraumluftfeuchte aller Messobjekte gemäß ÖNORM EN ISO 13788; es ist die lineare Trendlinie der Tagesmittelwerte eines Kalenderjahrs (2019) dargestellt; es ist zu erkennen, dass die relative Raumluftfeuchte mit Ausnahme einer Wohneinheit in allen untersuchten Wohnungen im nicht kritischen Bereich liegt; | 85 |
| Abbildung 60: Verteilungsfunktionen der relativen Feuchtwerte an der Bauteiloberfläche für Simulationsvarianten und Monitoringdaten. Auf der y-Achse ist aufgetragen, in wieviel Prozent der Fälle eine gewisse Feuchte unterschritten wird. Es ist zu sehen, dass die Simulationsvariante 22°C; 0,4/h einen deutlich höheren Feuchtwert aufweist als die meisten Wohnungen. Die einzige Ausnahme bildet diesbezüglich Wohnung C_W2. | 87 |
| Abbildung 61: Verlauf des Mould-Index nach [OJA 11] in Wohnung C_W2. Es ist zu sehen, dass es kein Schimmelrisiko auf dem Putz gibt. Auf sensitiven Flächen kommt es zu mikroskopischem Schimmelwachstum. | 88 |
| Abbildung 62: Situation am Beginn des Innenausbaus der Souterrain-/Gartenwohnungen im Gebäude B; es ist die abgeflämmte (3-lagige Bitumenabdichtung) Bodenplatte sowie der umlaufende Hochzug der Abdichtung zu sehen; im rechten Foto sind Durchdringungen des Hochzugs dokumentiert; | 89 |
| Abbildung 63: Grundriss der Souterrain-/Gartenwohnungen im Gebäude B mit Markierung der Messpositionen im Fußbodenaufbau; blau markierte Positionen befinden sich im Raum und stellen einen nahezu eindimensionalen Schichtaufbau dar; orange markierte Positionen befinden sich an Boden-Wand-Anschlüssen bzw. an einem Boden-Fensterstock-Anschluss und stellen einen mehrdimensionalen Bauteilaufbau dar; | 90 |
| Abbildung 64: Querschnitt durch eine Souterrain-/Gartenwohnung im Gebäude B mit Markierung des Fußbodenaufbaus f2b und ungefährender Markierung der Sensorpositionen | 90 |
| Abbildung 65: Montage der T/reILF-Kombisensoren im Fußbodenaufbau; gebundene Schüttung mit Folie und Trittschalldämmung (oben links); Lage des Sensors unter der gebundenen Schüttung (oben rechts); Lage des Sensors zwischen Estrich und geklebtem Parkett (unten links und rechts);..... | 91 |
| Abbildung 66: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den oberen Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt; | 92 |
| Abbildung 67: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den mittleren Messpositionen unter der Dampfbremse im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt;..... | 93 |
| Abbildung 68: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über drei Jahre an den unteren Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt; | 94 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 69: Verlauf der Temperatur über drei Jahre an den oberen Messpositionen im Fußbodenaufbau; die ungestörten Messpositionen im eindimensionalen Schichtaufbau sind blau dargestellt, die Messpositionen am Fußboden-Wand-Anschluss sind orange hinterlegt; | 95 |
| Abbildung 70: Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie CO ₂ -Konzentration in Stundenmittelwerten in der Testwohnung; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; unbrauchbare Messdaten während eines Ausfalls der Steuerung sind grau hinterlegt; | 97 |
| Abbildung 71: Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie absolute Luftfeuchte in Stundenmittelwerten in der Testwohnung und im Außenbereich; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; unbrauchbare Messdaten während eines Ausfalls der Steuerung sind grau hinterlegt;..... | 97 |
| Abbildung 72: Ausschnitt aus den Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie CO ₂ -Konzentration in Stundenmittelwerten in der Testwohnung; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; es sind zwei Zeiträume dargestellt, in denen die CO ₂ -Konzentration 1000 ppm übersteigt und die Steuerung somit einen höheren Luftwechsel aktiviert;..... | 98 |
| Abbildung 73: Ausschnitt aus den Messdaten des Betriebsmodus und des Luftvolumenstroms der Lüftungsanlage in Minutenwerten sowie absolute Luftfeuchte in Stundenmittelwerten in der Testwohnung und im Außenbereich; der Betriebsmode 3 entspricht der Steuerung mit „intelligent automatic“; es sind Zeiträume dargestellt, in denen die absolute Außenluftfeuchte die absolute Raumluftfeuchte übersteigt und die Steuerung somit nur einen Grundluftwechsel aktiviert;..... | 99 |
| Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in der Testwohnung während der Entfeuchtung. Die Zacken des Intervallbetriebs des Entfeuchters sind deutlich zu erkennen..... | 100 |
| Abbildung 75: Monitoring – Dampfeintrag aus Bauteilen über dem Dampfdruck der Raumluft. Es ist zu erkennen, dass sich der Eintrag bei steigendem Dampfdruck verringert. | 100 |
| Abbildung 76: Simulation – Dampfeintrag aus Bauteilen über dem Dampfdruck der Raumluft (nur Sommermonate). Der Eintrag aus Bauteilen ist höher als im Monitoring. | 101 |
| Abbildung 77: Vom Putzhersteller angefertigte Verbundproben vor dem Aufsaugversuch | 102 |
| Abbildung 78: Übersichtsdiagramm zur Streuung des Verlaufs der Wasseraufnahme der zehn Verbundproben im Aufsaugversuch bis zum Erreichen der Grenzfläche zwischen Ziegel und Putz. Dargestellt sind gemessene Kurven (blau) und Kurven, die aus den Messungen über lineare Regression ermittelt wurden (rot). Gemittelt über alle Proben resultiert ein mittlerer Wasseraufnahmekoeffizient von $21,41 \pm 3,95 \text{ kg/m}^2/\text{Wurzel(h)}$ | 102 |
| Abbildung 79: Verlauf der gemessenen flächenspezifischen Wasseraufnahme der zehn Verbundproben im Aufsaugversuch. Erläuterungen zum Knick im Zeitverlauf (in der Lücke zwischen der blauen und orangen Kurve) sind im entsprechenden Abschnitt der Methodik, Seite 44, enthalten. | 103 |
| Abbildung 80: Foto der Verbundprobe nach dem Aufsaugversuch. Erkennbar ist die geringe Steighöhe der Feuchtefront in der Putzschicht. Der Putz hat eine – verglichen mit dem Ziegel – geringe Saugkraft. Foto: Sascha Zeiler. | 104 |
| Abbildung 81: Drucklos im Wasserbad gelagerte Verbundproben..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 82: Verlauf der Gesamtmasse bei der Bestimmung der freien Wassersättigung an fünf Verbundproben. Probe 8 enthält einen Anfangsmessfehler. Die Zeitdauer bis zum Abbruch der Messung betrug ca. sechs Tage..... | 105 |
| Abbildung 83: Trocknungsversuch: Verbundprobe 8, fünf Minuten nach Trocknungsbeginn. | 105 |
| Abbildung 84: Trocknungsversuch: Verbundprobe 8, acht Tage nach Trocknungsbeginn. Die Probe ist erst oberflächlich trocken (hellgrauer Bereich des Putzes). Foto: Sascha Zeiler. | 106 |
| Abbildung 85: Verlauf der Masseabnahme der zehn Verbundproben während des Trocknungsversuchs. Blaue offene Ringe: Messpunkte; gestrichelte Linien: lineare Regression in zwei unterscheidbaren Trocknungsphasen. | 106 |
| Abbildung 86: Übersichtsdiagramm zur Streuung des Verlaufs der Wasseraufnahme der fünf Putzproben im Aufsaugversuch. Dargestellt sind gemessene Kurven (blau) und Kurven, die aus den Messungen über lineare Regression ermittelt wurden (orange). Gemittelt über alle Proben resultiert ein mittlerer Wasseraufnahmekoeffizient von $0,80 \pm 0,48 \text{ kg/m}^2/\text{Wurzel(h)}$ | 107 |
| Abbildung 87: Aufsaugversuch, Foto der reinen Putzprobe 5, hochkant in das Wasser gestellt. Eine horizontal deutlich asymmetrische Feuchteverteilung ist erkennbar: Das Wasser steigt an einer Probenseite schneller hoch. | 108 |
| Abbildung 88: Regeltechnischer Entscheidungsbaum Kellerlüftung. Der kritische Entscheidungspfad/Fall ist rot eingezeichnet. Hier besteht aus hygienischer Sicht Lüftungsbedarf, wobei die Lüftung zur Auffeuchtung der Nutzungseinheit führt. Dies wird in Kauf genommen, da im Gesamtzeitverlauf das Schimmelrisiko ausreichend gering bleibt. | 110 |
| Abbildung 89: Wärmebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur. Die maximale Luftwechselrate beträgt bei diesen Varianten 0,6/h. | 111 |
| Abbildung 90: Wärmebilanz in Abhängigkeit der maximalen Luftwechselrate. Die Soll-Innentemperatur beträgt bei diesen Varianten 22°C. | 112 |
| Abbildung 91: Heizwärmebedarf der Zone | 112 |
| Abbildung 92: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate. Die Soll-Innentemperatur beträgt in diesen Varianten 22°C. | 113 |
| Abbildung 93: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Lüftungsrate, bevor ein eingeschwungener Zustand erreicht wurde (erstes Simulationsjahr). Die Soll-Innentemperatur beträgt in diesen Varianten 22°C. | 114 |
| Abbildung 94: Feuchtebilanz in Abhängigkeit der Soll-Innentemperatur. Die maximale Luftwechselrate beträgt bei diesen Varianten 0,6/h. | 114 |
| Abbildung 95: Feuchtebilanz im Jahresverlauf (Soll-Innentemperatur: 22°C, Luftwechsel: 0,6/h) | 115 |
| Abbildung 96: Mould Index im Jahresverlauf an der erdberührten Wandoberfläche in verschiedenen Höhen. Soll-Innentemperatur 22°C, maximale Luftwechselrate 0,4/h..... | 117 |
| Abbildung 97: Raumluft-Zustände der Basisvariante im Behaglichkeitsfeld (Viereck) und erweiterten Behaglichkeitsfeld (Achteck). (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr) | 118 |
| Abbildung 98: Raumluft-Zustände bei Variation der Luftwechselzahl (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr) | 119 |
| Abbildung 99: Raumluft-Zustände bei Variation der Soll-Innentemperatur (orange – Sommerhalbjahr, blau – Winterhalbjahr) | 119 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 100: Überschreitungshäufigkeiten von 70% relativer Luftfeuchte und 26°C Raumlufthtemperatur für die Simulationsvarianten..... | 120 |
| Abbildung 101: Median des benötigten Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Winter. Die Fehlerindikatoren zeigen das 10% und das 90% Quantil an. (80% der Fälle liegen dazwischen.) | 122 |
| Abbildung 102: Zusammensetzung des Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Winter aus thermischer Energie und Energieverbrauch der Lüftungsanlage | 122 |
| Abbildung 103: Median des benötigten Energieaufwands für das Abführen von einem Kilogramm Feuchte im Sommer. Die Fehlerindikatoren zeigen das 10% und das 90% Quantil an. (80% der Fälle liegen dazwischen.) | 123 |
| Abbildung 104: Zusammensetzung des Energieaufwands aus thermischer Energie und Energieverbrauch der Lüftungsanlage für das Abführen eines Kilogramms Feuchte im Sommer ... | 123 |
| Abbildung 105: Gegenüberstellung des Wärmeverlusts der Erdgeschoßwohnung durch die Kellerdecke vor der Sanierung des Kellers (schraffierte Fläche) und des Heizwärmebedarfs der sanierten Souterrain-/Gartenwohnung. Der HWB der Gartenwohnungen ist durchwegs geringer als der Wärmeverlust durch die Kellerdecke vor der Sanierung. | 124 |
| Abbildung 106: Verteilung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit im Jahr 2019 an verschiedenen Standorten; Datensatz als Außenklimarandbedingung für sämtliche durchgeführten hygrothermischen Simulationen. | 149 |
| Abbildung 107: Verteilung der gemessenen Temperatur und des berechneten konvektiven Wärmeübergangswiderstands im Jahr 2019..... | 149 |
| Abbildung 108: Verlauf der im Klimadatensatz für die Simulation verwendeten Diffusstrahlung..... | 149 |
| Abbildung 109: Durchfeuchtungsgrad der Bohrmehlproben in den straßenseitigen Messquerschnitten..... | 150 |
| Abbildung 110: Durchfeuchtungsgrad der Bohrmehlproben an den Messquerschnitten der Feuermauer, der Hofmauer und der Mittelmauer | 150 |
| Abbildung 111: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 151 |
| Abbildung 112: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 152 |
| Abbildung 113: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W3 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 153 |
| Abbildung 114: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung B_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 154 |
| Abbildung 115: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung B_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 155 |
| Abbildung 116: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung C_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 156 |
| Abbildung 117: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung C_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 157 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 118: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung D_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788..... | 158 |
| Abbildung 119: Materialparameter Mauerwerk..... | 159 |
| Abbildung 120: Materialparameter Putz..... | 160 |
| Abbildung 121: Materialparameter Erdreich | 161 |

8.4. Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Auflistung aller Monitoringobjekte mit automatisierter Langzeitmessung | 40 |
| Tabelle 2: Simulationsvarianten | 50 |
| Tabelle 3: Maßangaben zur Wohneinheit und zum abgewickelten Modell | 52 |
| Tabelle 4: Berücksichtigte innere Lasten..... | 60 |
| Tabelle 5: Header und erste Datensätze der Klimarandbedingung für die Eingabe in das Simulationsprogramm HAM4D_VIE | 62 |
| Tabelle 6: Übersicht der Wärmeverbräuche aus den Energieausweisberechnungen der Planung sowie aus realen Wärmeverbrauchsabrechnungen ausgewählter Souterrain-/Gartenwohnungen | 71 |
| Tabelle 7: Empfindlichkeitsklassen verschiedener Materialien [OJA 11]..... | 116 |
| Tabelle 8: Mould Index als Stufen des Schimmelwachstums [OJA 11] | 117 |

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

9.1.1. Datenerstellung und Dokumentation

Im Projekt „space4free“ wurden Messdaten von Raumklimata, Außenklimata, Bauteiluntersuchungen sowie von Lüftungsregelungen erfasst. Die Daten bestehen aus Messwerten der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, CO₂, VOC und diversen Regelgrößen im EIN/AUS-Zustand. Außerdem wird zu jedem Wert einer Messgröße das aktuelle Datum und die Uhrzeit gespeichert. Die Daten liegen in unterschiedlichen Messintervallen vor, von Ein-Minuten-Intervallen bis hin zu Ein-Stunden-Intervallen. Die Datenerfassung erfolgt nach drei verschiedenen Verfahren: Es wurden vollautomatische Datenlogger eingesetzt, die laufend Messdaten aufzeichnen und diese einmal täglich per E-Mail an ein speziell eingerichtetes Postfach bei Gassner & Partner senden. Zusätzlich bestehen Datenlogger, die die Messdaten lokal auf einer SD-Card speichern. Diese Daten müssen von einer Person manuell ausgelesen werden. Die dritte Variante der Datenspeicherung besteht aus mobilen Datenloggern, die temporär eingesetzt wurden und die Messdaten im Gerät speichern, bis sie von einer Person ebenfalls manuell ausgelesen werden. Sämtliche Messdaten, sei es automatisiert an das E-Mail-Postfach übermittelt oder manuell per SD-Card oder Software ausgelesen, werden auf einem eigens eingerichteten Messdatenserver bei Gassner & Partner gespeichert.

Die Dokumentation der Messdaten erfolgt in einer Messdatenbank. Die Daten sind einzelnen Projekten zugeordnet. Zusätzlich werden die Rohdaten in einer Windows-Ordnerstruktur mit den jeweiligen Projektnamen abgelegt. Die Verknüpfung der Messdaten mit den Projekten erfolgt über eine kurze Dokumentation der Montage sowie der Inbetriebnahme des jeweiligen Monitorings. Außerdem liegt jeder Dokumentation ein Plan der tatsächlichen Sensorpositionen bei. Dadurch ist die Möglichkeit einer Messdatenauswertung durch Dritte sichergestellt.

9.1.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die Daten unterliegen grundsätzlich dem Urheberrecht, das bei Gassner & Partner liegt. Sämtliche Monitoringdaten mit Bezug zu einem Nutzer:innen-Verhalten wurden unter Einhaltung und vorherigem Abschluss eines Datennutzungsvertrags gemäß Datenschutzgrundverordnung erhoben. Darin wurde vereinbart, dass sämtliche personenbezogenen Daten zwar in der Rohfassung gespeichert, jedoch nur in anonymisierter Form publiziert werden dürfen. Dies betrifft insbesondere alle Daten von Raumklimamessungen aber auch von Bauteilmonitorings, die in genutzten Wohneinheiten stattgefunden haben bzw. noch immer stattfinden.

9.1.3. Datenspeicherung und -erhalt

Die Messdaten werden auf einem eigens eingerichteten Messdatenserver bei Gassner & Partner gespeichert. Dies erfolgt in einer Datenbank, die täglich einen Datenimport, eine Datenplausibilitätskontrolle sowie eine Datensortierung zur Steigerung der Datenbankperformance durchführt. Außerdem wird ein tägliches backup erstellt, das auf einem externen Laufwerk außerhalb

des Büros von Gassner & Partner gespeichert wird. Die Zuständigkeit für die Funktionalität der Datenbank und die Sicherungen liegt bei Gassner & Partner.

9.1.4. Wiederverwendbarkeit der Daten

Alle im Zuge des Projekts „space4free“ gesammelten Daten wurden mit dem Projektpartner TU Wien geteilt und sind außerhalb der Organisation von Gassner & Partner ausschließlich für eine Nutzung in gemeinsamen Publikationen vorgesehen. Innerhalb der Organisationseinheit von Gassner & Partner sowie von Ulreich Bauträger werden die im Projekt „space4free“ gewonnenen Daten auch zur laufenden Qualitätssicherung und zur Dokumentation eigener Projekte verwendet. Außerdem werden Daten auszugsweise für Werbefolder oder Referenzen herangezogen. Nach dem Projektende von „space4free“ sind sämtliche Datennutzungen außerhalb der Organisation von Gassner & Partner in eigens zu errichtenden Verträgen zu vereinbaren.

9.2. Detailangaben zum halbsynthetischen Außenklima

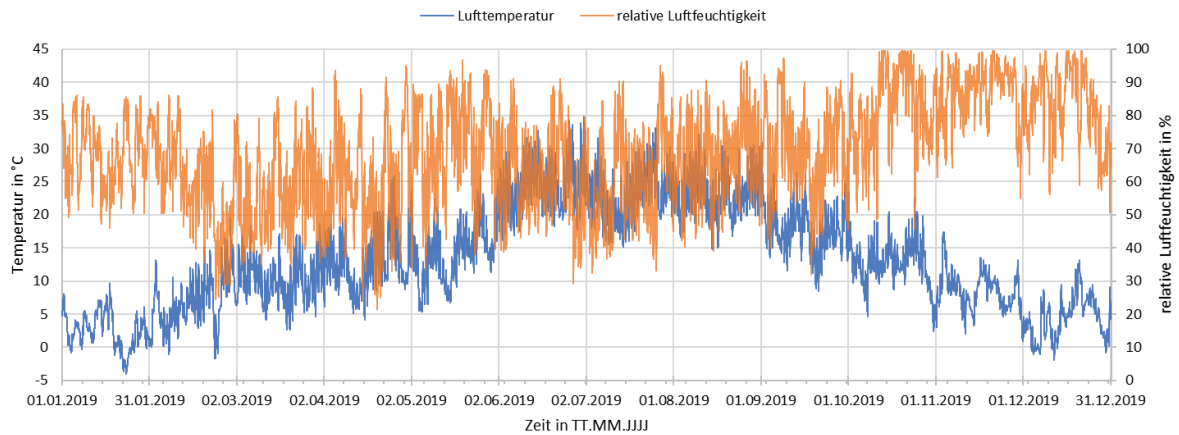


Abbildung 106: Verteilung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit im Jahr 2019 an verschiedenen Standorten; Datensatz als Außenklimarandbedingung für sämtliche durchgeführten hygrothermischen Simulationen.

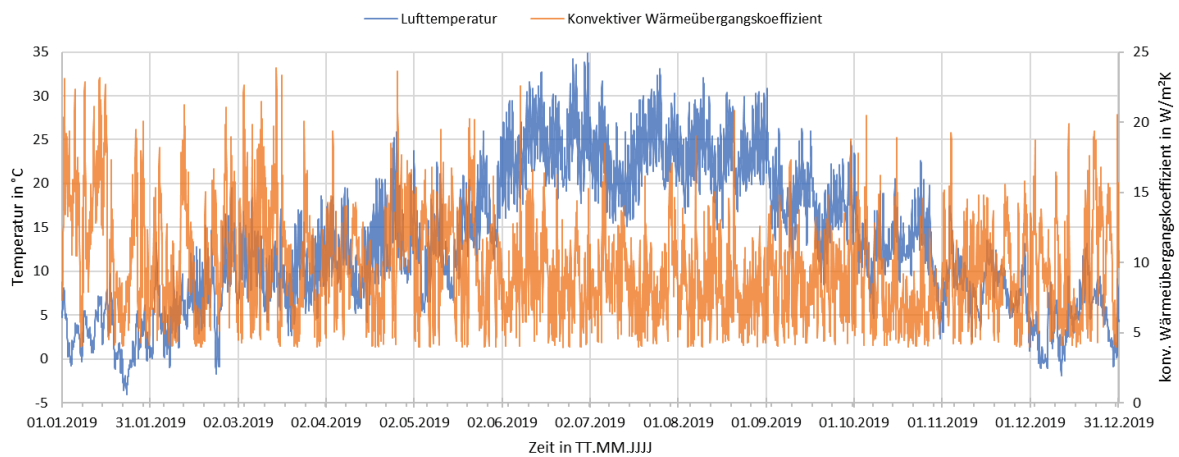


Abbildung 107: Verteilung der gemessenen Temperatur und des berechneten konvektiven Wärmeübergangswiderstands im Jahr 2019

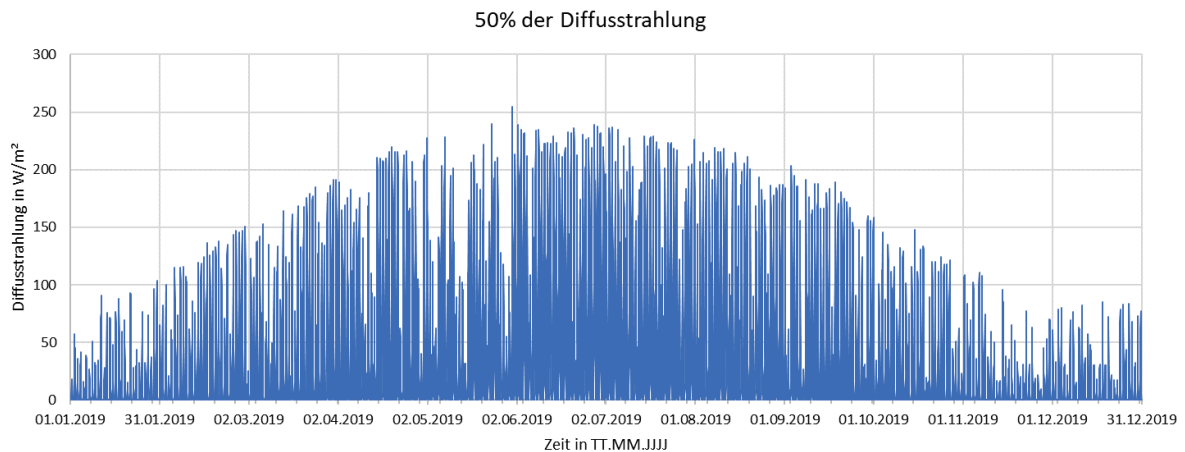


Abbildung 108: Verlauf der im Klimadatensatz für die Simulation verwendeten Diffusstrahlung

9.3. Mauerfeuchtemessungen – weitere Diagramme

Ergänzend zu den Feuchtegehalten der Bohrmehlproben sind im Folgenden die Durchfeuchtungsgrade der Proben angegeben.

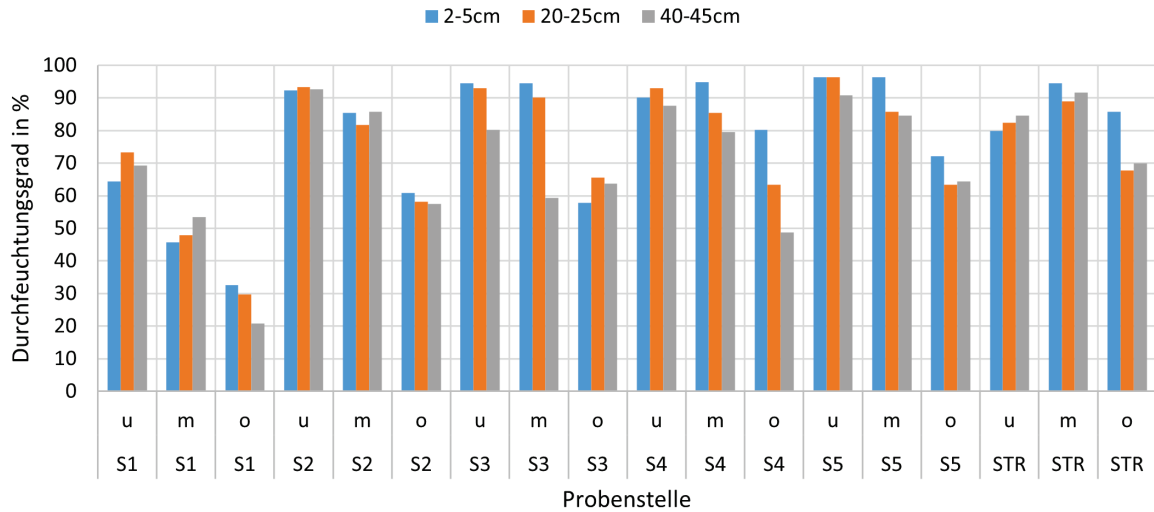


Abbildung 109: Durchfeuchtungsgrad der Bohrmehlproben in den straßenseitigen Messquerschnitten

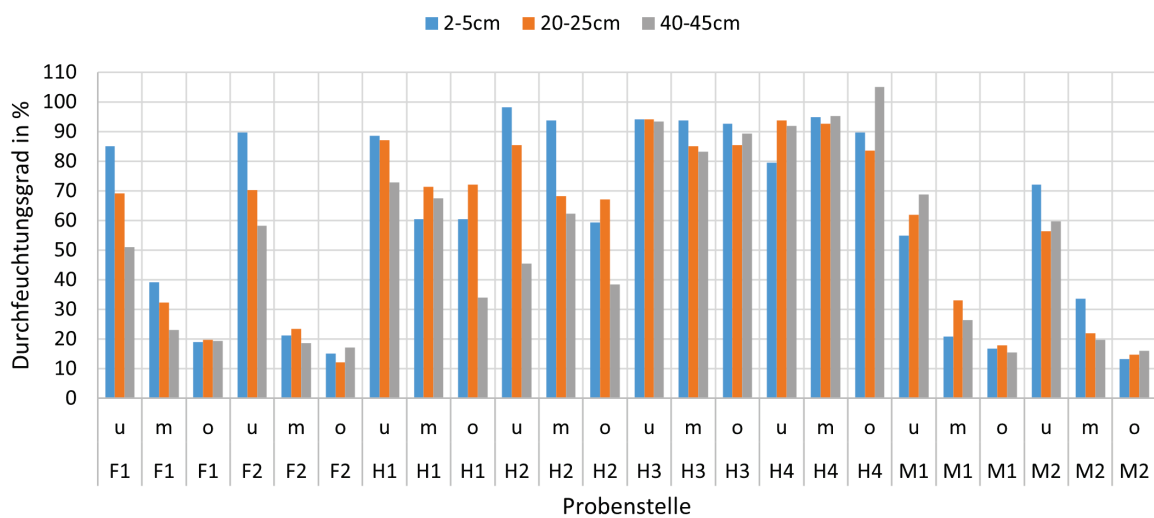


Abbildung 110: Durchfeuchtungsgrad der Bohrmehlproben an den Messquerschnitten der Feuermauer, der Hofmauer und der Mittelmauer

9.4. Detailergebnisse der Raumklimamessungen

Raumklimamessungen Wohnung A_W1

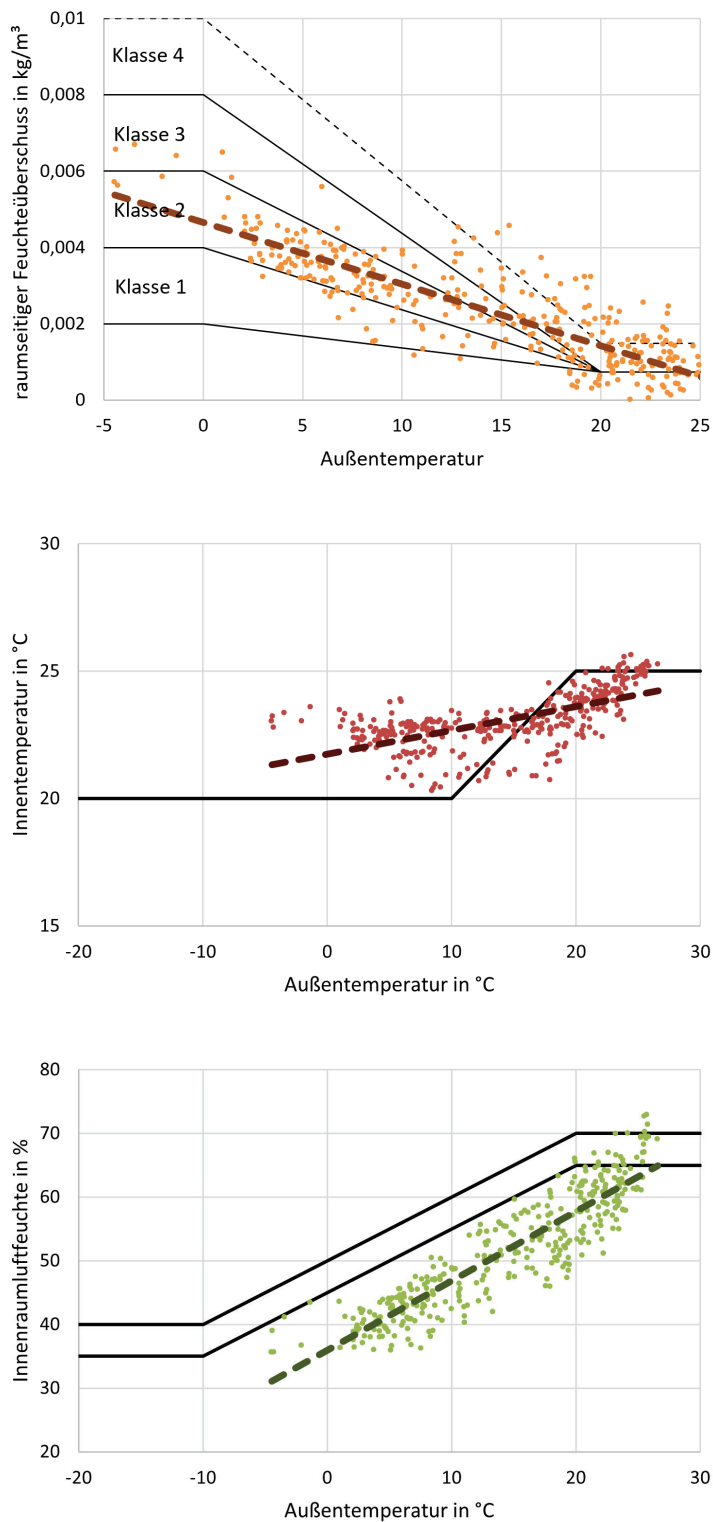


Abbildung 111: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung A_W2

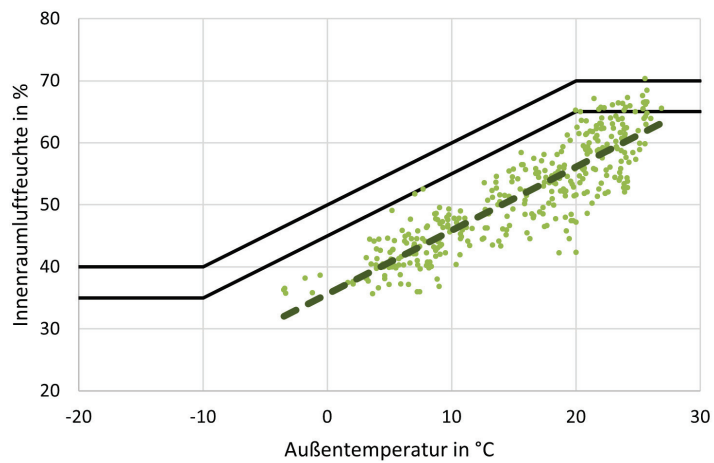
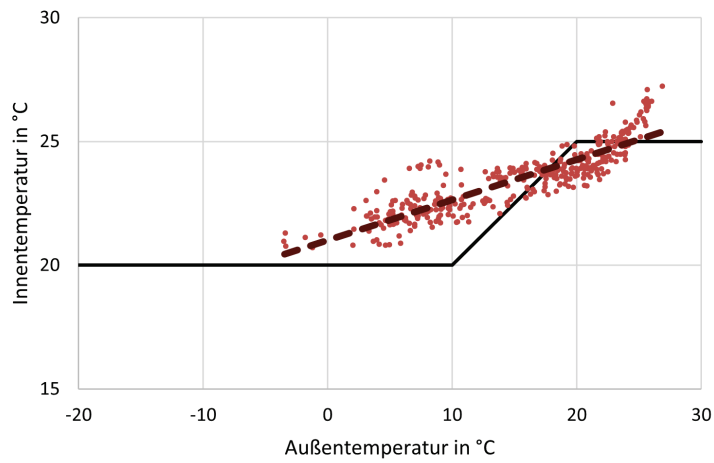
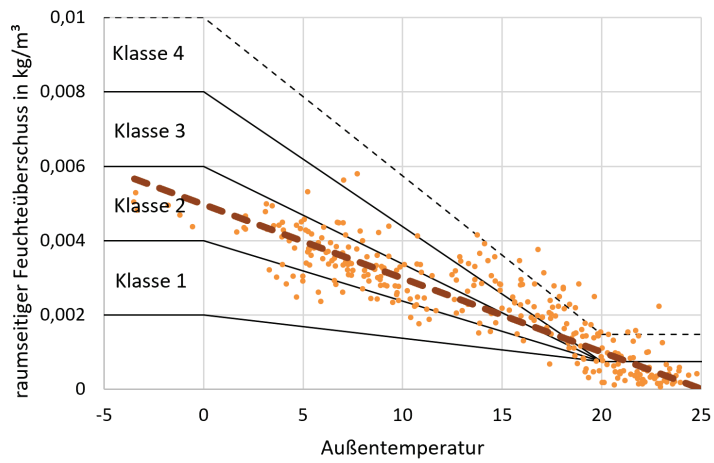


Abbildung 112: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung A_W3

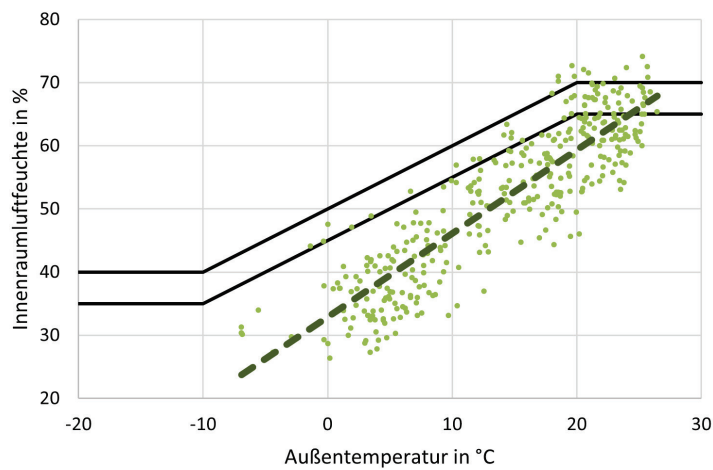
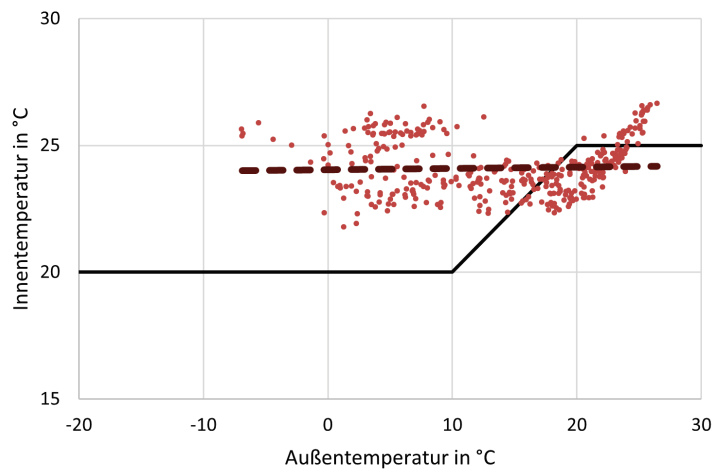
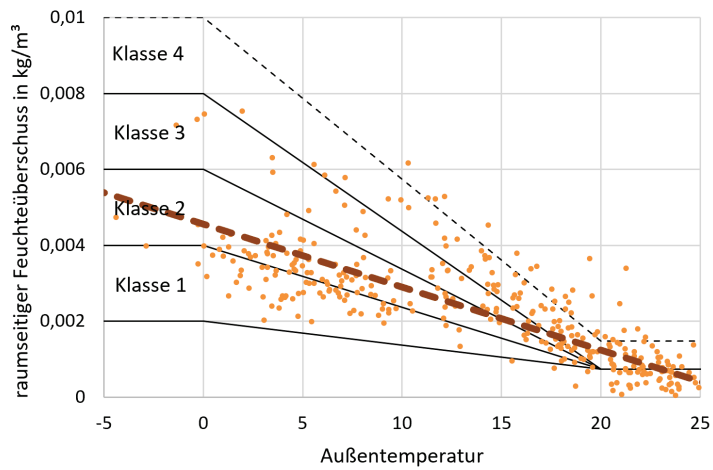


Abbildung 113: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung A_W3 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung B_W1

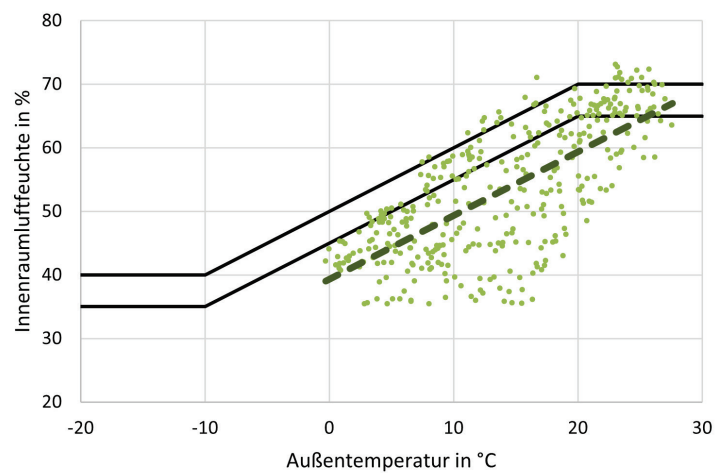
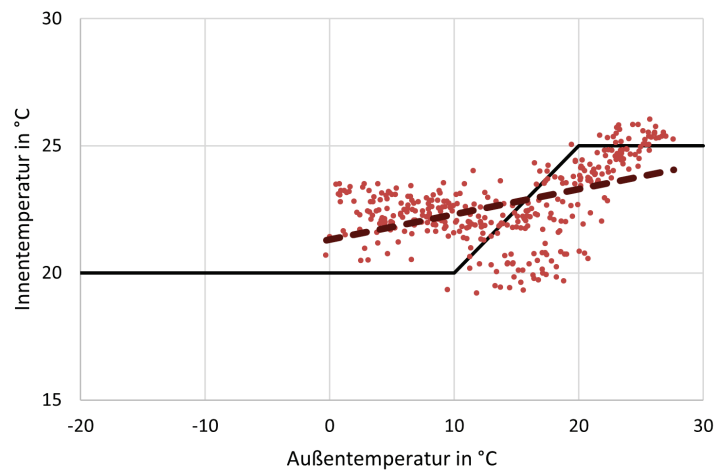
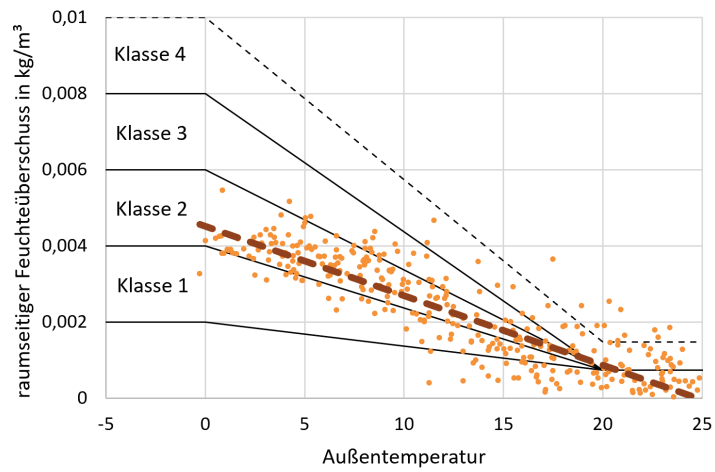


Abbildung 114: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung B_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung B_W2

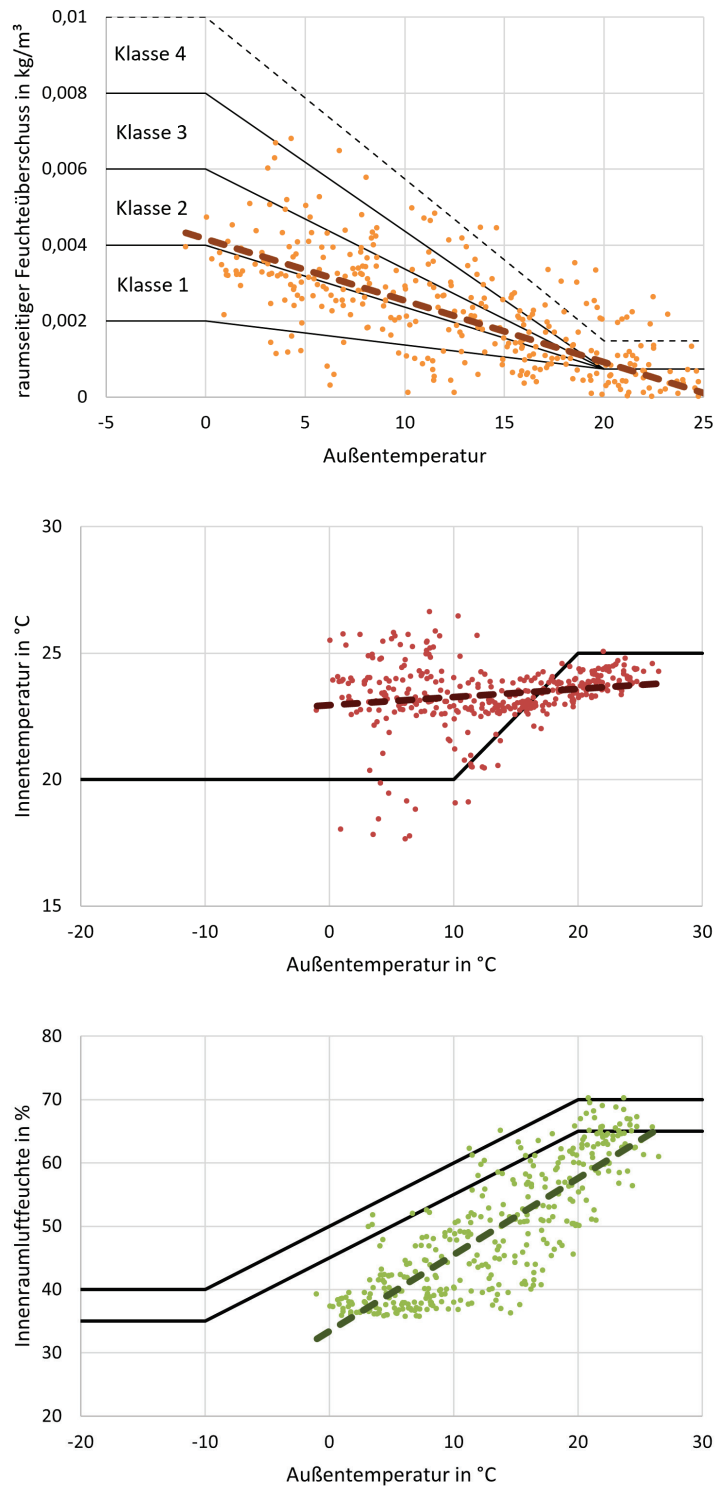


Abbildung 115: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung B_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung C_W1

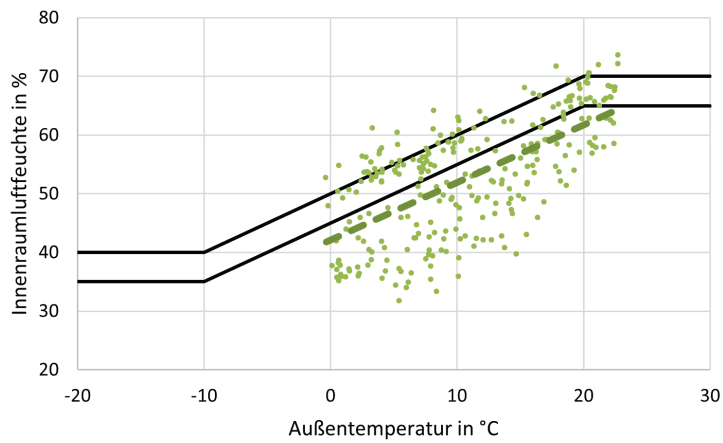
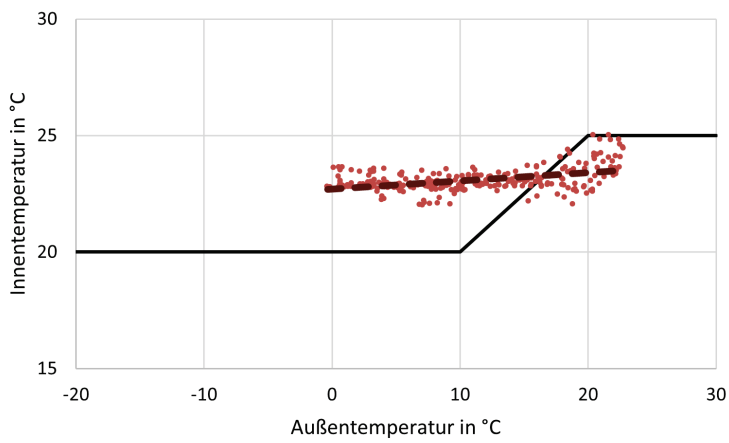
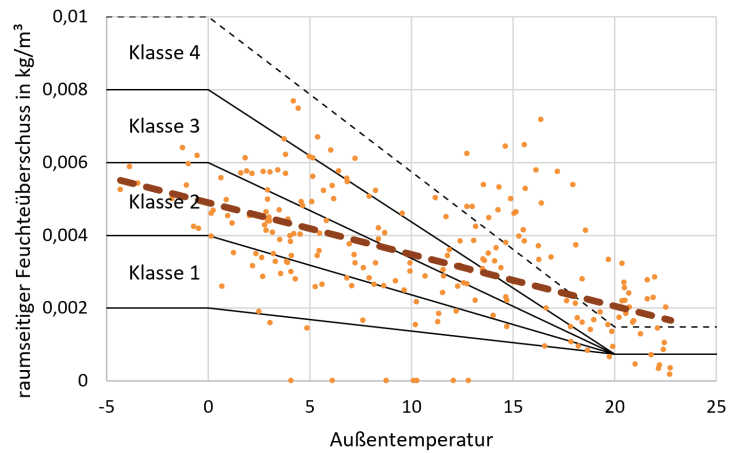


Abbildung 116: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung C_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung C_W2

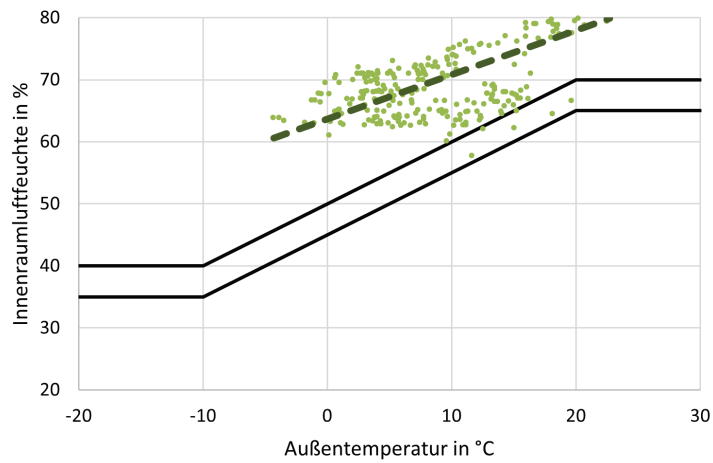
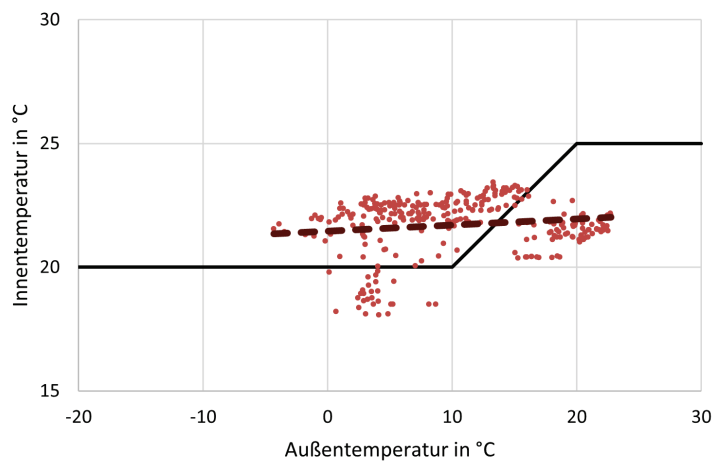
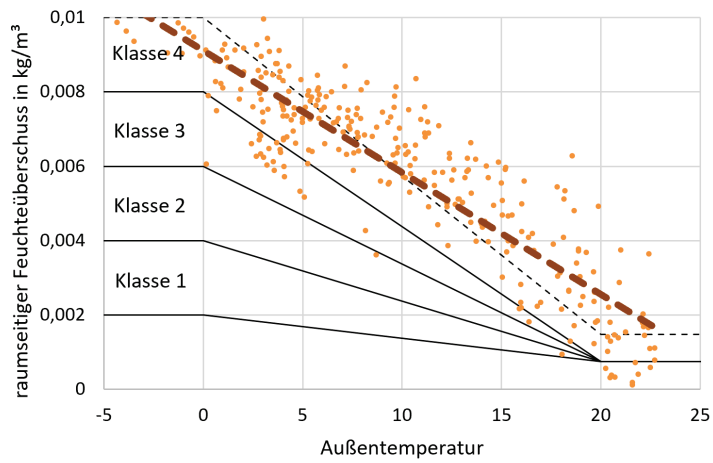


Abbildung 117: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung C_W2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

Raumklimamessungen Wohnung D_W1

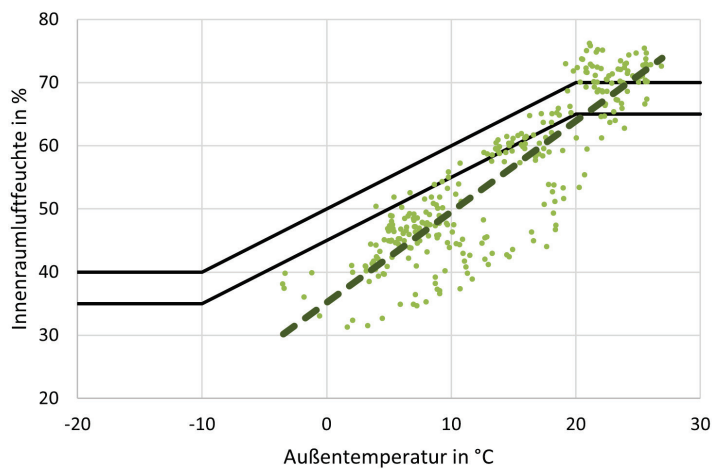
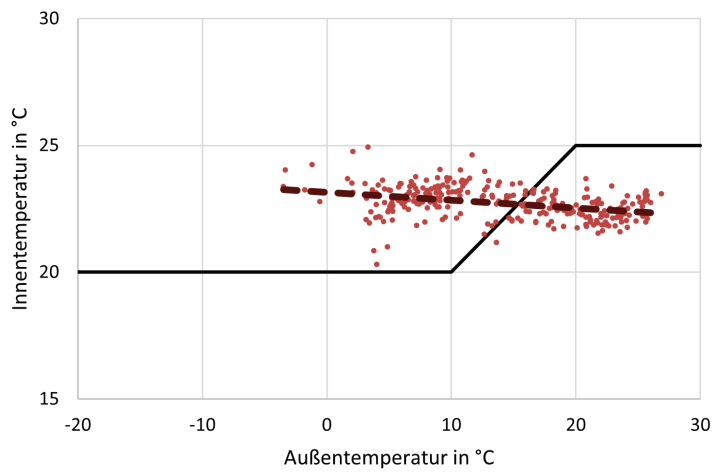
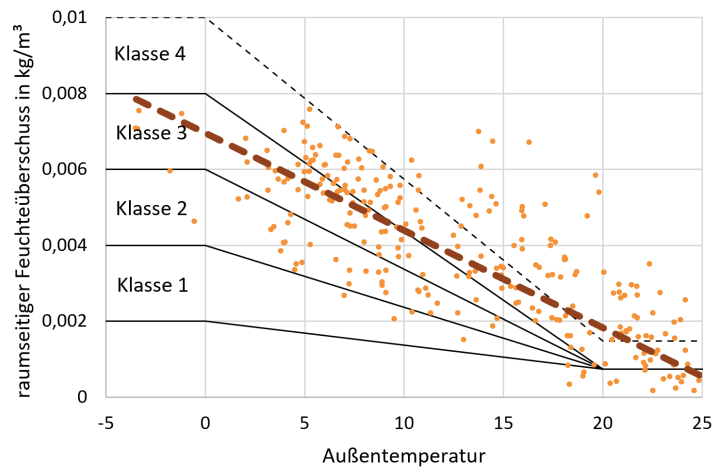


Abbildung 118: Auswertung des gemessenen Raumklimas in Wohnung D_W1 gemäß ÖNORM EN ISO 13788

9.5. Materialdaten

Mauerwerk

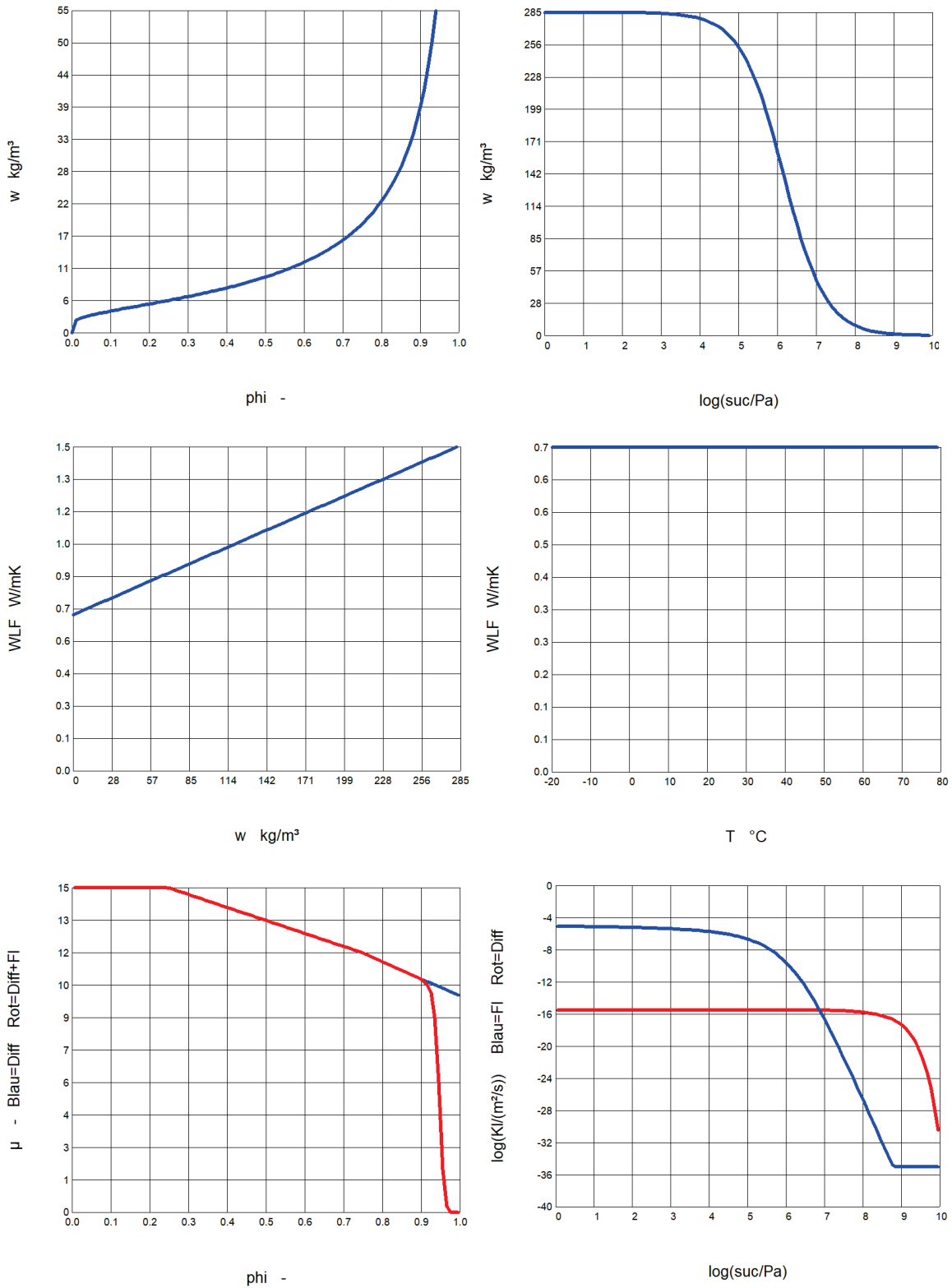


Abbildung 119: Materialparameter Mauerwerk

Putz

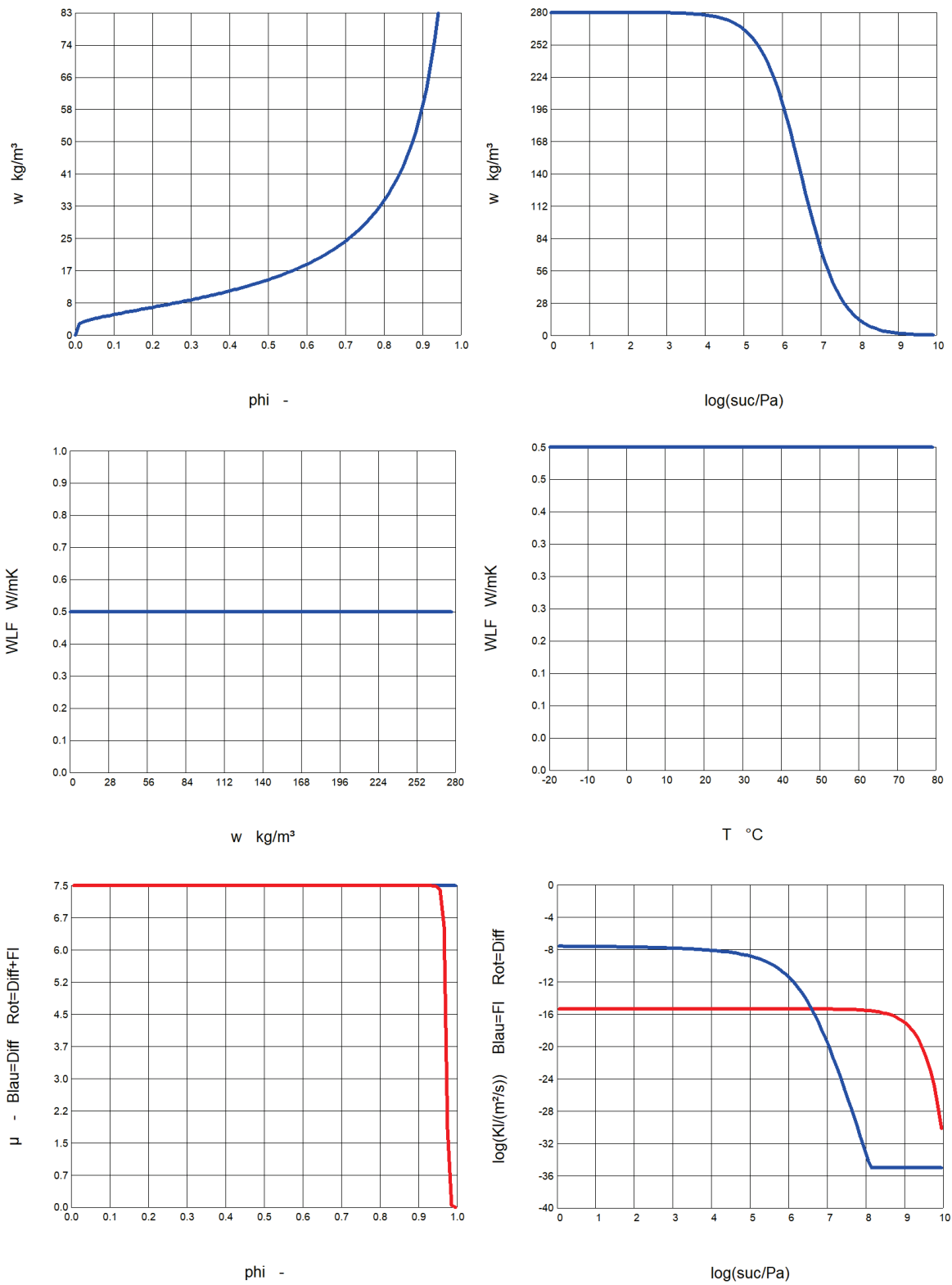


Abbildung 120: Materialparameter Putz

Erdboden

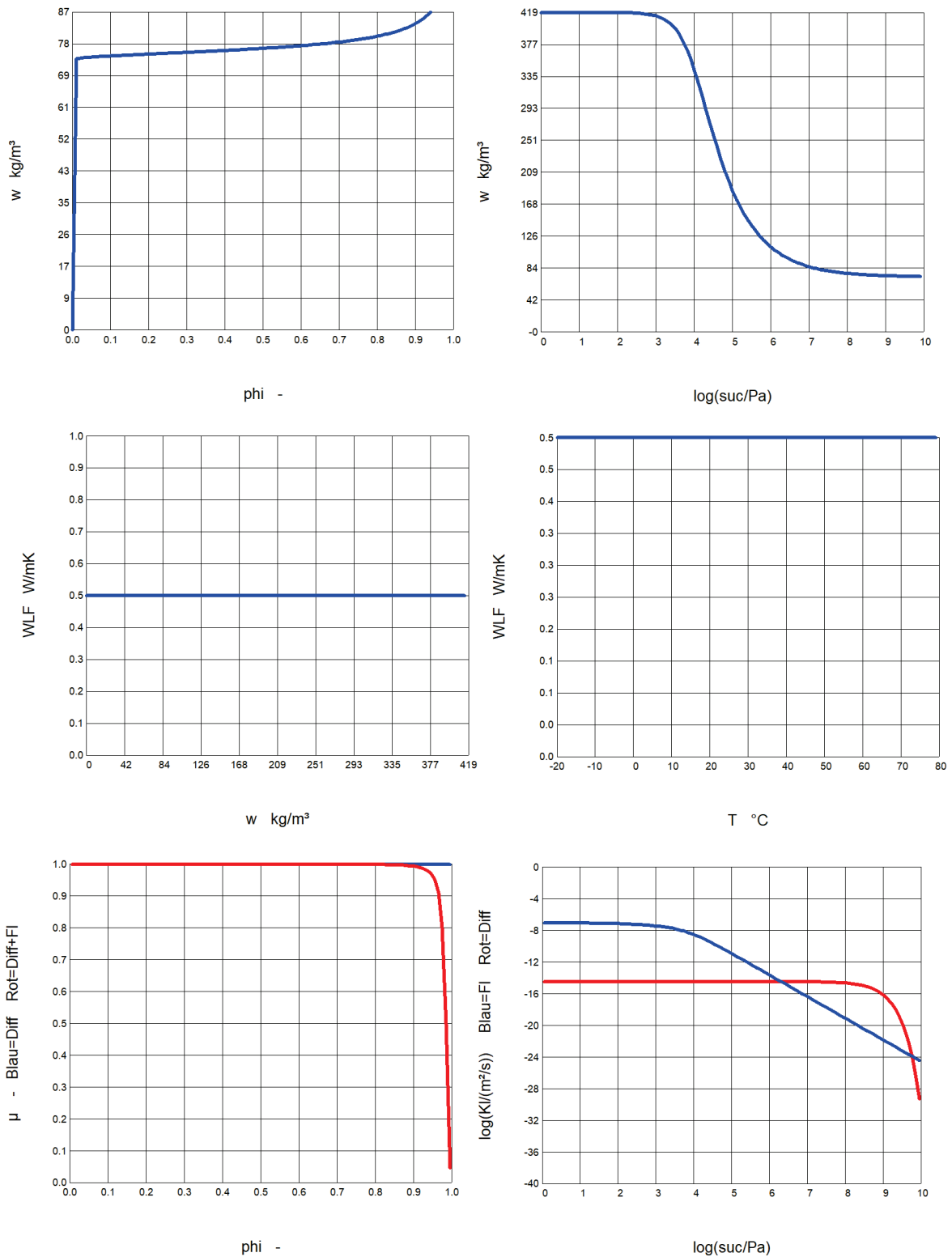


Abbildung 121: Materialparameter Erdreich

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)