

1.	Grundlegendes zur Bauphysik	76
1.1	Bauphysikalische Fragestellungen	76
1.2	Modell Plato-Wild-Ensemble	76
1.3	Wärme- und Feuchteschutz	78
2.	Bestandsanalyse und Bauschäden	88
2.1	Risse und Feuchteschäden	88
2.2	Baustofffeuchtemessungen	102
2.3	Bohrkernanalysen	107
2.4	Parameter für den Wärmeschutz	108
2.5	Schallschutzmessungen	112
3.	Berechnungen und Simulationen	116
3.1	Kritische Anschlussdetails	116
3.2	Glaser-Verfahren (Außenwand)	116
3.3	Thermische Berechnungen	119
3.4	Hygrothermische Simulationen	128
3.5	Alternativen zur Innendämmung	137
4.	Brandschutz	140
4.1	Grundlagen	140
4.2	Plato-Wild-Ensemble	144



Teil D
Bauphysik und Bauschadensanalyse

1. Grundlegendes zur Bauphysik

1.1 Bauphysikalische Fragestellungen

Bauphysik und Bauschadensanalyse hängen eng miteinander zusammen. Die meisten alterungsbedingten Bauschäden sind Folgen von Kapillarkondensation, Durchfeuchtung oder thermomechanischen Belastungen.

Abb. 71 zeigt ein Schema zur bauphysikalischen Bewertung der vorhandenen Bausubstanz und potenzieller Sanierungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen. Dabei wird zwischen typologischen, empirisch-analytischen und rechentechnischen Vorgehensweisen unterschieden, die je nach Situation angemessen sind.

Im Fokus steht zunächst die wärmeschutztechnische Ertüchtigung der Gebäudehülle. Dabei kommt es jedoch nicht nur auf die Reduktion der Transmissionswärmeverluste und der Verluste durch Gebäudeundichtigkeiten und Lüftung an, sondern auch auf einen stabilen Feuchtehaushalt, sodass Schimmelpilzwachstum in den Wohnräumen vermieden und Tauwasser in den Bauteilen der Hülle begrenzt wird.

Aufsteigende (kapillare) Feuchte aus dem Erdreich führt zu stark erhöhter Mauerwerksfeuchte im Keller und im Sockelbereich bzw. Erdgeschoss, ja gelegentlich sogar noch im 1. Obergeschoss durch den Einfluss schädlicher Salze. Als Folgeschäden sind Fäulnis, Putzabplatzer, Brüche und Risse sowie (im Inneren des Gebäudes) Schimmelbildung zu beobachten. Die Ursachen für mechanische Schäden sind Salzkristallisation und Hydratation. Die Bauschadensanalyse umfasst schließlich neben Untersuchungen zu Rissbildung und Putzschäden an der Fassade auch Feuchteschäden im Dachstuhl.

Tab. 4 enthält die relativen Häufigkeiten von Bauschäden an verschiedenen Bauteilen in Alt- und Neubauten.¹

¹ Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (1995): Dritter Bauschadensbericht der Bundesregierung.

Bauschäden an...	Altbau	Neubau
Fenster und Türen	4%	5%
erdberührte Bauteile	15%	19%
Fußboden	5%	12%
Decken	5%	4%
Dach und Böden	33%	27%
Fassade	38%	33%

Tab. 4 Aus dem Dritten Bauschadensbericht der Bundesregierung (1995): Schadensanteil in % bei Bauschäden (Vergleich Altbau/Neubau)

Durch Mauerwerksabdichtung, Trockenlegung und Injektionsverfahren können Verbesserungen erzielt werden², es gibt aber auch alternative Verfahren, die auf dem Konzept einer Bauteiltemperierung beruhen („thermische Horizontalsperre“).^{3, 4} Diese Methoden werden in den Abschnitten 2.1 und 2.2 noch genauer beleuchtet und kommen beim Sockelheizungskonzept zur Anwendung (siehe Abschnitt 3.4.1 und Kapitel E).

Neben den Wärmeverlusten und Feuchteproblemen an flächigen Bauteilen sind auch kritische Konstruktionsdetails im Anschlussbereich von Fenstern, einbindenden Innenwänden und vor allem Tragbalken der Holzdecken in der Außenwand zu untersuchen. Schimmel und Fäulnis an Holzbalkenköpfen können gravierende Auswirkungen auf die Statik des Gebäudes haben. Sanierungsmaßnahmen dürfen hier keinesfalls zu höheren Risiken führen.

Schließlich sind auch Schallschutz und Brandschutz zu überprüfen. Nach Aussagen des Deutschen Mieterbundes legen 82% der Mieter besonderen Wert auf einen ausreichenden Schallschutz. Damit steht dieses Kriterium an der Spitze der genannten Kriterien, vor Keller (75%), Wohnfläche (65%), Balkon (61%) oder Garage (42%). Während der Schallschutz durch das Massivmauerwerk von Altbauten meist sehr gut ist, bieten undichte bzw. schalldurchlässige Fenster und Türen sowie unzureichend gedämmte Holzbalkendecken⁵ weniger befriedigenden Schutz gegen Straßenlärm und Trittschall.

1.2 Modell Plato-Wild-Ensemble

Anhand des Regensburger Plato-Wild-Ensembles soll die Vorgehensweise in diesem Kapitel exemplarisch dargestellt werden.

² Frössel, Frank (2011): Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat. 3., komplett überarb. und erw. Aufl. Stuttgart [auch Baulino-Verl., Leest/Werder (Havel)]: Fraunhofer IRB Verlag.

³ Großschmidt, Henning (2004): Das temperierte Haus. Sanierte Architektur – Behagliche Räume – „Großvitrine“. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD). Wien (Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, 9).

⁴ Künzel, Helmut (2007): Bauphysik und Denkmalpflege – Teil 9. Bauteiltemperierung nach Großschmidt. In: Der Bausachverständige 3 (2), S. 14–17.

⁵ Gösele, Karl (1989): Verbesserung des Schallschutzes von Holzbalkendecken bei der Modernisierung von Gebäuden. Untersuchungen im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsberichte Bau- und Wohnforschung, F 2144).

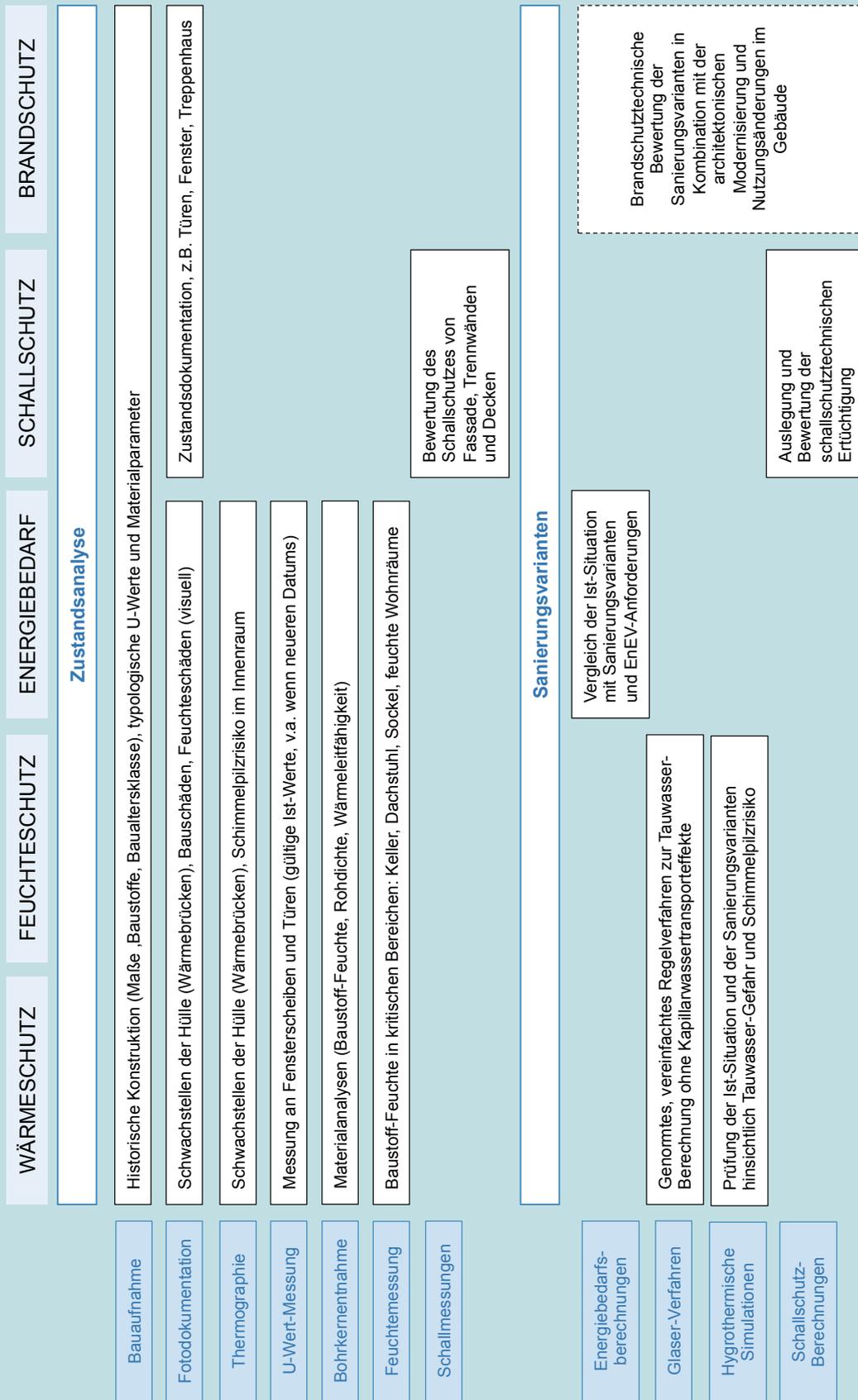


Abb. 71 Schematische Übersicht über Aspekte und Verfahren für die bauphysikalische Analyse

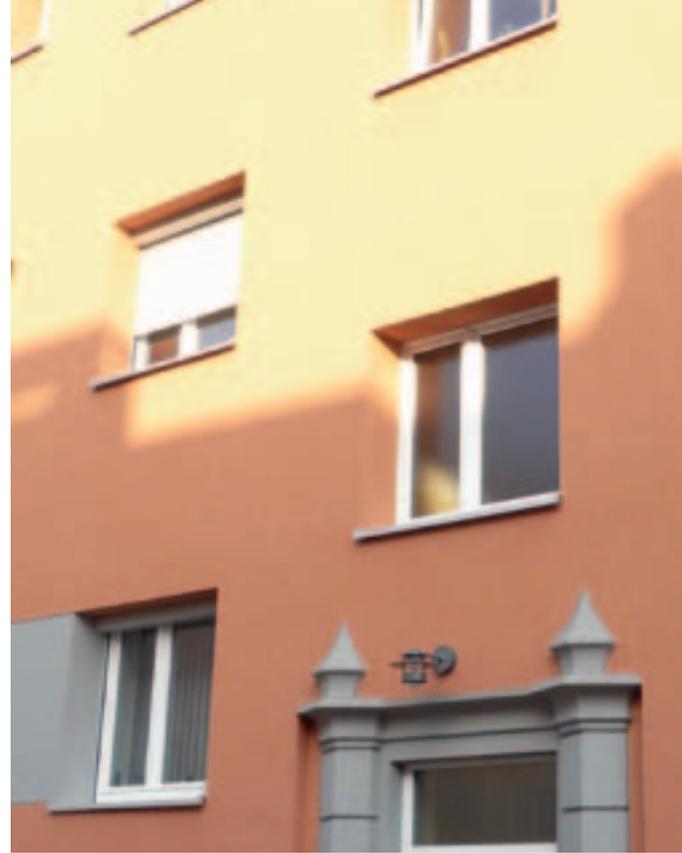


Abb. 72 Wärmedämmverbundsysteme zerstören wesentliche Elemente der historischen Fassadengestaltung und führen zu einer Verzerrung der Proportionen (Fotos: Steffens)

Eine ausführliche Fotodokumentation der Befundsituationen in (zugänglichen) Innenräumen und von Fassade, Dach und Keller dient der Definition und Priorisierung spezifischer Restaurationsmaßnahmen.

Schäden an der Außenseite des Gebäudes und thermografische Analysen unterstützen die Identifikation von Schwachstellen in der Gebäudehülle. Diese werden durch Baustofffeuchtemessungen und weitere Analysen ergänzt.

Besonderes Augenmerk sollte auf die Situation in den Wohnräumen gerichtet werden. Hier geben Raumklimamessungen, Oberflächenfeuchte- und Temperaturmessungen sowie konkrete Nutzerbefragungen (siehe Kapitel C) Aufschluss über kritische Zustände.

Danach müssen die Konstruktionsdetails der Gebäudehülle und der Zwischendecken sowie deren Bauteile erfasst werden. Hier können wir von der umfassenden Bauaufnahme aus Kapitel A ausgehen. Die Bauteileigenschaften werden typologisch abgeschätzt und teilweise durch analytische Messungen im Detail untersucht, z. B. Bohrkernentnahmen. U-Wert-Messungen an den Fenstern, thermografische Aufnahmen diverser Fassaden und Feuchtemessungen im Innenbereich ergänzen diese Analysen. Die so erhobenen Parameter werden später für die Berechnung des Wärmebedarfs vor und nach Sanierung und für die bauphysikalischen Wärme-Feuchte-Simulationen verwendet.

Weitere Untersuchungen wie Schallschutzmessungen und brandschutztechnische Bewertungen des

Bestands schließen den experimentellen Teil der Bestandsaufnahme ab.

Im theoretischen Teil werden Berechnungen und bauphysikalische Simulationen für die Ist-Situation und mögliche Sanierungsvarianten durchgeführt, um die Wirksamkeit von Wärmeschutzmaßnahmen und ihre Ausführung an kritischen Anschlussdetails quantitativ zu beurteilen. Damit können unterschiedliche Lösungskonzepte verglichen und objektspezifisch ausgewählt werden.

1.3 Wärme- und Feuchteschutz

Dem Wärmeschutz kommt eine große Bedeutung in der Altbausanierung zu. Die Hauptaufgabe des Wärmeschutzes ist die Trennung von Innen- und Außenklima. Dabei soll ein hygienisches, behagliches Innenklima sichergestellt und die Bauteilsicherheit unter Begrenzung des dafür erforderlichen Energieaufwands gewährleistet werden.

Der Anteil der Wohngebäude in Deutschland, die vor der 1. Wärmeschutzverordnung aus dem Jahre 1977 erbaut wurden, beträgt nach Informationen der Deutschen Energie-Agentur GmbH ca. 70%.⁶ Darunter fällt auch der Anteil von etwa 15% des Wohngebäude-

⁶ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), www.kfw.de. Abgerufen am 27. November 2012 von http://www.kfw.de/kfw/de/1/11/Download_Center/Foerderprogramme/versteckter_Ordner_fuer_PDF/Leitfaden_Waermebruecken_in_der_Bestandssanierung.pdf (04/2008).

bestandes, der zwischen 1919 und 1948 erbaut wurde.

Die Teilaufgaben des baulichen Wärmeschutzes sind nach Krätschell und Anders (2012):⁷

- Erzielen eines behaglichen Raumklimas
- Vermeidung von Zwängungsspannungen
- Vermeidung von Tauwasser
- Vermeidung von Schimmelpilzbildungen
- Vermeidung von Diffusionsschäden

Grundlegende Maßnahmen zur Sicherstellung des dauerhaften, mangelfreien Wärmeschutzes umfassen entsprechend:

- Wärmedämmung zur Vermeidung kritischer Oberflächentemperaturen (innen)
- Luftdichtheit zur Tauwasservermeidung aufgrund einströmender Luft durch Außenbauteile
- Diffusionstechnisch korrekter Aufbau der einzelnen Bauteilschichten zur Vermeidung von Tauwasserausfall im Inneren des Bauteils
- Mindestluftwechsel zur kontrollierten Feuchteabfuhr
- Sonnenschutzmaßnahmen gegen Überhitzung

Zwar können die Wärmeverluste über die Gebäudehülle durch nachträgliche Dämmmaßnahmen reduziert werden, um heutige Anforderungen zu erfüllen. Für historisch wertvolle Fassaden verbietet sich jedoch eine außenseitig angebrachte Wärmedämmung in der Regel. Nachträglich aufgebrachte Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) oder Dämmplatten führen zu deutlich tieferen Fensterlaibungen, verringerten Dachüberständen und vor allem verdecken sie Fassadendetails wie Gesimse oder Lisenen, Eingangsportale usw. und verändern so den Charakter des Gebäudes erheblich (Abb. 72). Die Montage eines WDVS ist auch meist mit zerstörerischen Eingriffen an der Substanz verbunden, ist also auch aus konservatorischer Sicht kritisch zu sehen. Die verwendeten speziellen Putzmaterialien (die geprüft nach der europäischen Richtlinie ETAG 004 eine Lebensdauer von 25 Jahren aufweisen

⁷ Krätschell, Michael; Anders, Frank (2012): Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, Bd. 32).

sollten) stellen nicht nur einen Bruch in der Materialität der Bestandsstruktur dar, sondern im Bereich von Anschlüssen an Gebäudeöffnungen, Stoßkanten (z. B. Gesimsen) besteht die Gefahr von Putzrissen und vorzeitigen Schäden; für die Anschlussausbildung gibt es keine bauaufsichtliche Regelung.⁸ Entsprechend sind bei unsachgemäßer Ausführung diverse Schadensphänomene zu beobachten.^{9, 10}

Daher müssen alternative Dämmmöglichkeiten untersucht werden. Eine besondere Rolle spielt hier die kapillaraktive Innendämmung auf Calciumsilikat-Basis. Alternative diffusionsoffene Lösungen aus Mineralwolle oder Naturmaterialien wie Holzfaser oder Zellulose kommen u.U. auch in Betracht. Eine diffusionsdichte Konstruktion beinhaltet bei fehlerhafter Verarbeitung, z.B. undichten Anschlussfugen, ein höheres Risiko lokaler Tauwasserbildung in der Konstruktion und so dauerhafter Schädigung der Substanz. Bei Schlagregenbelastung des Wandquerschnitts sind kapillaraktive Innendämmungen den nur diffusionsoffenen bzw. diffusionsdichten Dämmungen ohne Kapillaraktivität allerdings überlegen, weil nur hier eine wirksame Austrocknung nach innen möglich ist.¹¹ Dies ist insbesondere zu berücksichtigen, weil sich Wasseraufnahmefähigkeit und Austrocknungseigenschaften infolge der langfristig kühleren Außenwandschale maßgeblich verändern können.¹²

Für die Bestandskonstruktion sind drei Größen ausschlaggebend für die wärme- und feuchtetechnische Beurteilung:

- Wärmedurchlasswiderstand bzw. U-Wert (siehe „Wärmeschutz“)
- Wasserdampf-Diffusionswiderstand
- Schlagregenaufnahme

Durch Schlagregen kann eine beträchtliche Wasser-

⁸ Buecher, Bodo (2012): Regelmäßig warten und instand setzen. Sanierung alter und schadhafter Wärmedämm-Verbundsysteme. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (2), S. 14–18.

⁹ Bady, Sabine (2010): Der Fehlerteufel liebt das Detail. Detailplanung bei WDVS-Anschlüssen. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (4), S. 11–13.

¹⁰ Jehl, Wolfgang (2013): Anschluss gesucht und gefunden. Fenstermontagen in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS). In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (5), S. 32–35.

¹¹ Bangerter, Heinz (2011): Kampf der Systeme. Dampfdichte Innendämmung. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (5), S. 61–64.

¹² Worch, Anatol (2010): Innendämmung = Tauwasser? In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (4), S. 26–29.

menge in die Konstruktion eingebracht werden. Worch (2014) nennt hier in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen Werte bis zu 100 kg/m^2 , im Vergleich zu typischen Tauwassermengen infolge von Wasserdampfdiffusion in der Größenordnung von 1 kg/m^2 pro Jahr.¹³

Dass bei richtiger Ausführung einer kapillaraktiven Innendämmung die typischen Probleme von erhöhter Tauwasserbildung oder Schimmelbildung im Bereich von Anschlussfugen vermieden werden können, wird durch viele Beispiele in der Literatur belegt.^{14, 15, 16} Durch hygrothermische Simulationen lassen sich kritische Konstruktionen besser verstehen und korrekt dimensionieren.

Zu Beginn steht eine genaue Analyse des Gebäudebestands hinsichtlich der verwendeten Materialien und Konstruktion und deren Wärmeschutzeigenschaften.

Nach Bestimmung bzw. typologischer Festlegung der Wärmeleitfähigkeiten und der aus der Konstruktion abgeleiteten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) lassen sich erste Aussagen über den Wärmebedarf und die Sanierungspotenziale ableiten.

1.3.1 Wärmebrücken

Wärmebrücken gehören zu den Schwachstellen in einer Baukonstruktion. Sie stellen örtlich begrenzte Bereiche dar, die eine größere Wärmestromdichte im Vergleich zu den angrenzenden Bauteilbereichen aufweisen. Dabei ändert sich auch die Richtung des Wärmestroms: Die Stromlinien sind nicht mehr (wie durch ein homogenes plattenförmiges Bauteil) gerade und senkrecht zur Bauteiloberfläche, sondern verlaufen gekrümmt (konvergent oder divergent). Im Vergleich zum ungestörten Bauteil verursacht diese erhöhte Wärmestromdichte nicht nur einen zusätzlichen Wärmeverlust, sie verringert im betreffenden Bereich auch die Oberflächentemperatur des Bauteils.

Damit sind Wärmebrücken häufig Ursache für Tauwas-

¹³ Worch, Anatol (2014): Innen dämmen – außen gucken. Prüfen des Schlagregenschutzes. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (1), S. 16–19, zuletzt geprüft am 20.02.2014.

¹⁴ Gänßmantel, Jürgen (2010): Von draußen sieht man nichts. Marktübersicht Innendämmung. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (4), S. 30 ff.

¹⁵ B+B (2012): Marktübersicht Innendämmung. In: Bauen im Bestand B+B/Trockenbau Akustik Spezial, S. 42–53.

¹⁶ Krus, Martin; Silberhorn, Oswald; Kilian, Ralf; Kratzmeier, Matthias (2013): Innovative Innendämmung im Denkmalschutz. Energetische Sanierung des Augsburger Landesamts für Finanzen – Simulation und messtechnische Begleitung. In: Bausubstanz (1), S. 24–33.

erschäden und Schimmelbildung. Die Lokalisation kritischer Wärmebrücken in der Konstruktion und deren wärmeschutztechnische Verbesserung ist eine entscheidende Sanierungsaufgabe.

Die Schutzmaßnahmen leiten sich ab aus:

- allgemein anerkannten Regeln der Bautechnik sowie den technischen Regeln, eingeführt von den obersten Baubehörden durch öffentliche Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen (insbesondere DIN 4108-2:2013-02)
- Fachliteratur über Wärmebrücken und deren Auswirkung auf den Wärmeschutz, z. B. Feldmann und Becker (2008)¹⁷ oder Hauser und Stiegel (2006)¹⁸
- rechnerischen Untersuchungen von Wärmebrücken mit entsprechenden Rechnerprogrammen (Wärmebrückenberechnung) nach den Vorgaben der DIN EN ISO 10211:2008-04¹⁹

Man unterscheidet (siehe Abb. 75):

- Konstruktiv bedingte bzw. materialbedingte (stoffliche) Wärmebrücken

Materialbedingte Wärmebrücken entstehen im Übergangsbereich zwischen nebeneinanderliegenden Materialien mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten. Insbesondere kleine Strukturelemente wie Stahlbetonstützen oder Holzpfeiler in einer Mauerwerkswand, Mörtelfugen im Mauerwerk oder dämmschichtunterbrechende Innenwände wirken selbst als Wärmebrücken innerhalb der regulären Bereiche.

- Formbedingte/geometrische Wärmebrücken

Sobald ein Bauteil von der ebenen Form (Platte) abweicht, beispielsweise wenn die kühlere, wärmeaufnehmende Innenoberfläche größer ist als die wärmeabgebende Außenoberfläche, entste-

¹⁷ Feldmann, Rainer; Becker, Thomas (2008): Wärmebrücken in der Bestandssanierung – Leitfaden für Fachplaner im Gebäudebereich. Deutsche Energie-Agentur. Berlin.

¹⁸ Hauser, Gerd; Stiegel, Horst (2006): Wärmebrückenkatalog für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (74).

¹⁹ Die DIN EN ISO 10211 definiert die Anforderungen und beschreibt die theoretischen Grundlagen zur numerischen Berechnung von Wärmebrücken in zwei und drei Dimensionen mittels Finite-Element-Methode.

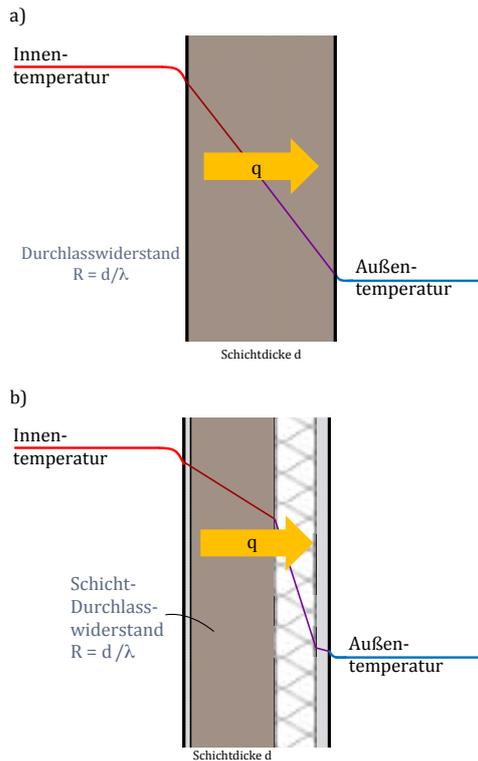


Abb. 73 a) Wärmedurchgang durch ein einschichtiges (homogenes) Bauteil
b) Situation für ein mehrschichtiges Bauteil mit gleichem U-Wert und gleicher Wärmestromdichte q

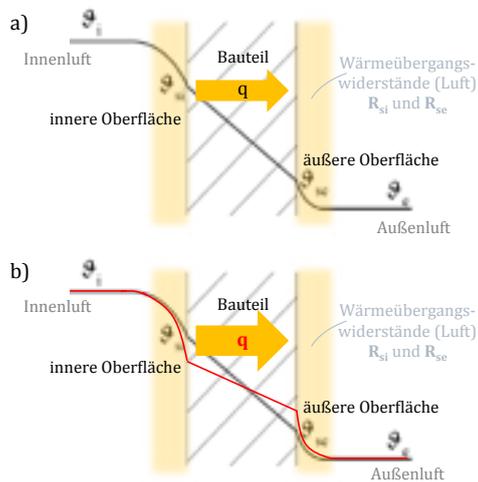


Abb. 74 Wärmeübergang:
a) Temperaturverlauf für ein homogenes Bauteil zwischen Innen- und Außenluft. Die Übergangsbereiche sind farblich hervorgehoben.
b) Änderung der Oberflächentemperaturen bei höherem U-Wert infolge eines geringeren Durchlasswiderstands (rote Linie). Die Absenkung an der inneren Oberfläche kann zu höherem Schimmelpilzrisiko oder gar Tauwasser führen.

Wärmeschutz

Wärmeleitfähigkeit und Wärmestromdichte

Durch eine Schicht der Dicke d , deren Seitenflächen einen Temperaturunterschied $\Delta\Theta$ (in K) aufweisen, fließt durch einen m^2 ein Wärmestrom, der proportional zu $\Delta\Theta$ und indirekt proportional zu d ist. Diese zeitlich konstante Wärmestromdichte

$$q = \lambda \Delta\Theta / d \quad (\text{in } W/m^2)$$

stellt sich unter zeitlich stabilen Temperaturverhältnissen, d.h. für eine „stationäre Situation“ ein. Die Wärmeleitfähigkeit zeigt in der Baupraxis nur eine geringe Temperaturabhängigkeit, sie kann sich aber in Abhängigkeit des Durchfeuchtungsgrades deutlich ändern.^a

Wärmedurchlasswiderstand

Der Wärmedurchlasswiderstand einer Schicht berechnet sich aus $R = d/\lambda$ (in $m^2 K/W$), es gilt: $q = \Delta\Theta/R$. Ein höherer Wärmedurchlasswiderstand reduziert also die Transmissionswärmeverluste. Er wird erreicht mit einer größeren Schichtdicke und/oder kleinerer Wärmeleitfähigkeit. Werden mehrere Bauteilschichten hintereinander gesetzt, so ergibt sich der Durchlasswiderstand ΣR der Gesamtkonstruktion aus der Summe der einzelnen Durchlasswiderstände.

Wärmeübergangswiderstand

Der Wärmeübergang von den Oberflächen eines Bauteils an die Umgebungsluft wird durch den Wärmeübergangswiderstand R_s beschrieben. Er hängt stark von der Luftbewegung ab und unterscheidet sich daher deutlich an der Innen- und Außenoberfläche. Rechnerisch werden z.B. gemäß DIN EN ISO 6946 die Werte $R_{si} = 0,13 m^2K/W$ für innen und $R_{se} = 0,04 m^2K/W$ für außen angesetzt (im Fall einer Außenwand).

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

Der Wärmedurchgangswiderstand ergibt sich aus der Summe von Durchlass- und Übergangswiderständen:

^a Krätschell, Michael; Anders, Frank (2012): Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, 32).

$$R_T = R_{si} + \Sigma R + R_{se}, \quad U = 1 / R_T$$

Der Kehrwert wird als Wärmedurchgangskoeffizient oder U-Wert bezeichnet. Er ist ein Maß für den Wärmeverlust durch eine Konstruktion:

$$q = \Delta\Theta / R_T = U \Delta\Theta$$

Oberflächentemperaturen

Die raumseitige Oberflächentemperatur Θ_{si} eines Außenbauteils wird bestimmt vom Wärmedurchgangskoeffizienten U , der Temperatur von Innen- und Außenluft Θ_i und Θ_e (mit Temperaturunterschied $\Delta\Theta = \Theta_i - \Theta_e$) sowie dem innenseitigen Übergangswiderstand R_{si} . Im stationären Fall gilt:

$$\begin{aligned} \Theta_{si} &= \Theta_i - q R_{si} = \Theta_i - U \Delta\Theta R_{si} \\ &= \Theta_i - \Delta\Theta R_{si} / R_T \end{aligned}$$

Mit steigendem Wärmeübergangswiderstand R_{si} im Verhältnis zu R_T (z.B. bei höherem U-Wert der Konstruktion oder schlecht belüfteten Oberflächen) sinkt die innere Oberflächentemperatur. Damit steigt das Risiko des Tauwasserausfalls und des Schimmelpilzwachstums (siehe 2.1.3). Kühlere Oberflächen werden zudem als unbehaglich empfunden aufgrund der geringeren Wärmeabstrahlung. Kritisch sind vor allem Wärmebrücken (siehe 1.3.1) mit örtlich verringerten Oberflächentemperaturen. Für die außenseitige Oberflächentemperatur gilt:

$$\begin{aligned} \Theta_{se} &= \Theta_e + q R_{se} = \Theta_e + U \Delta\Theta R_{se} \\ &= \Theta_e + \Delta\Theta R_{se} / R_T \end{aligned}$$

Mit größerem U-Wert steigt die Oberflächentemperatur, was durch thermografische Aufnahmen sichtbar gemacht werden kann. Eine detaillierte Darstellung findet man in Bauphysik-Lehrbüchern, z.B. Fischer et al. (2008).^b

^b Fischer; Freymuth; Häupl; Homann; Jenisch; Richter; Stohrer (2008): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

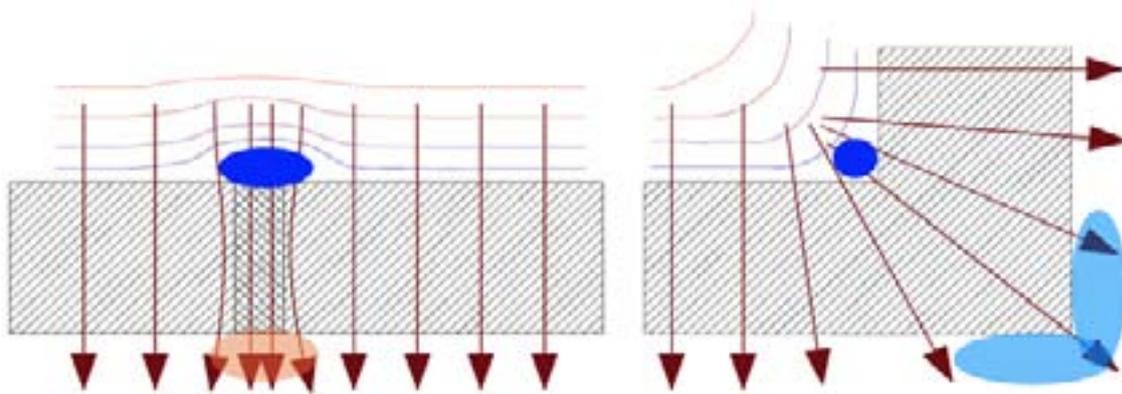


Abb. 75 Links: Materialbedingte Wärmebrücke durch konstruktive Elemente. Rechts: Geometrische/formbedingte Wärmebrücke, z. B. Außenecke eines Gebäudes. Rote Pfeile symbolisieren die Wärmestromdichte, blaue und rötliche Felder die Zonen erniedrigter bzw. erhöhter Oberflächentemperatur. Die farbigen Linien markieren Orte gleicher Temperatur (Isothermen).

hen an den geometrischen Abweichungen (z. B. Ecken, Kanten) Wärmebrücken. Der Effekt dieser Wärmebrücken ist dabei abhängig von dem Größenverhältnis zwischen Innen- und Außenfläche im Bereich der Wärmebrücke. Der ungünstigste Fall tritt an dreidimensionalen Bauteilanschlüssen auf. Hier weitet sich der Querschnitt für den Wärmestrom nach außen hin auf, es entstehen hohe Wärmestromdichten an der Anschlussstelle im Innenbereich („Kühlrippeneffekt“²⁰).

Es gibt auch Mischformen, bei denen die beiden oben genannten Erscheinungen zusammen auftreten. Als Beispiel hierfür können Außenwanddurchdringungen bei Balkonplatten oder Deckendurchdringungen von Stützen genannt werden. Sie werden allgemein als konstruktive Wärmebrücken bezeichnet.

Wärmebrücken sind Schwachstellen in der Baukonstruktion. Im Vergleich zu den ungestörten Bauteiloberflächen liegt im Bereich von Wärmebrücken stets eine niedrigere Oberflächentemperatur vor. Bedingt durch den erhöhten Wärmestrom kommt es zudem zu erhöhten Wärmeverlusten. Ihre Auswirkungen auf die Temperatur an der Oberfläche hängen davon ab, wie stark der Wärmeschutz an dieser Stelle geschwächt ist. Bei Absinken der Oberflächentemperatur bis unter die Taupunkttemperatur treten meist Tauwasserschäden auf. Ist deren Oberflächentemperatur nicht niedriger als die Taupunkttemperatur der Raumluft, bleiben Tauwasserschäden aus. Trotzdem machen sich Bereiche solcher Wärmebrücken durch verstärkte Staubablagerungen an diesen Stellen sichtbar.

Erhöhte Wärmeverluste

Der Wärmeverbrauch eines Gebäudes steigt durch den erhöhten Wärmeverlust, der im Bereich von Wärmebrücken verursacht wird (Abb. 77). Im ungünstigsten Fall können bei Bestandsgebäuden, welche nachträglich

²⁰ Feldmann, Rainer; Becker, Thomas (2008): Wärmebrücken in der Bestandssanierung – Leitfaden für Fachplaner im Gebäudebereich. Deutsche Energie-Agentur. Berlin.

mit einem hohen Wärmeschutz ausgestattet wurden, zusätzliche Wärmeverluste von weit über 30% des Energiebedarfs über Wärmebrücken entstehen.

Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit

Aufgrund der niedrigeren Wärmestrahlung werden kalte Oberflächen als unbehaglich empfunden. Viele Nutzer versuchen dies durch eine höhere Lufttemperatur, also erhöhte Heizleistung, zu kompensieren. Die Oberflächen sollten um nicht mehr als 3 Kelvin gegenüber der Raumluft absinken und 10 °C keinesfalls unterschreiten.

Mangelhafte Wohnhygiene

Aufgrund der erniedrigten Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücken kann es dort zu Tauwasserausfall kommen (siehe 1.3.2). Tauwasser bildet sich, wenn feuchtwarme Luft auf eine kalte Oberfläche trifft und dort unter den Taupunkt abgekühlt wird (dieser Effekt ist typischerweise im Winter anhand beschlagener Scheiben gut zu beobachten).

In Verbindung mit Staub und organischen Verunreinigungen, Tapetenkleister oder Farbe können an feuchten Oberflächen sehr schnell Schimmelpilze wachsen (siehe Abb. 87). Die abgeschiedenen Sporen von Schimmelpilzen können bei den Bewohnern allergische Erkrankungen verursachen.²¹ Besonders in Räumen mit nutzungsbedingten hohen Feuchtelasten wie Küche oder Bad ist die Gefahr von Schimmelbildung groß. Aus hygienischer Sicht sollte die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 30% und 60% liegen. Schimmelpilze können wegen der Kapillarkondensation in den Baustoffporen bereits ab 80% Oberflächenfeuchte wachsen.

Gefährdung der Bausubstanz

Tauwasser im Bereich von Wärmebrücken kann zu einer dauerhaften Durchfeuchtung des Bauteils führen.

²¹ Frössel, Frank (2010): Schimmelpilze in Wohnungen. Waldshut-Tiengen: Baulino.

Entstehung von Tauwasser

Luft enthält neben den Hauptbestandteilen Stickstoff und Sauerstoff sowie (in geringerer Menge) Kohlendioxid und weiteren Spurengasen eine je nach Feuchtegrad unterschiedliche Menge Wasserdampf. Der maximale Gehalt an Wasserdampf, der in der Luft aufgenommen werden kann, ist temperaturabhängig. Die von der Luft aufnehmbare Feuchtemenge steigt mit zunehmender Temperatur an. Ein Kubikmeter Luft kann bei einer Temperatur von +20°C maximal 17,3 g Wasserdampf aufnehmen, bei 0°C lediglich 4,8 g. Der tatsächlich vorliegende Wasserdampfgehalt ist meist deutlich geringer und wird durch die relative Luftfeuchte ϕ beschrieben: Das ist der Prozentsatz, den der vorliegende Wasserdampfgehalt c (in g/m^3) vom sogenannten Sättigungsgehalt c_s ausmacht. Da der Wasserdampf-Teildruck p (Partialdruck, gemessen in Pascal [Pa]) proportional zum Gehalt c ist, kann die relative Feuchte auch über den Bezug auf den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck p_s (bei Sättigung der Luft) ausgedrückt werden:

$$\phi = c/c_s = p/p_s$$

Bei Änderung der Temperatur ändert sich der Sättigungsgehalt bzw. der Sättigungsdampfdruck und damit die relative Luftfeuchte, ohne dass sich der absolute Feuchtegehalt bzw. der Partialdruck verändert.

Die Temperatur, bei der die Sättigungskonzentration c_s bzw. der Sättigungsdampfdruck p_s den Wert des vorhandenen Wasserdampfgehalts c bzw. des Partialdrucks p annimmt, heißt Taupunkttemperatur θ_s . Bei dieser Temperatur hat man eine relative Luftfeuchte von 100%, Tauwasser beginnt sich zu bilden. Bei üblichem Wohnklima (20°C und 50% relativer Luftfeuchte) beträgt die Taupunkttemperatur 9,3°C. Sobald bestimmte Oberflächen diese Temperatur unterschreiten, fällt auf diesen Tauwasser aus.

Schimmelpilzwachstum kann bereits bei einer dauerhaften Oberflächenfeuchte von 80% auftreten (durch

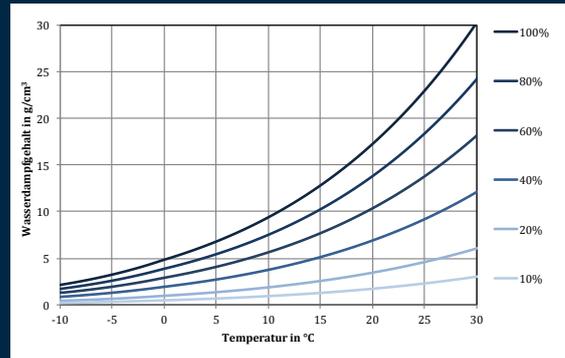


Abb. 76 Carrier-Diagramm: Darstellung des Sättigungsgehalts und des Feuchtegehalts bei gegebener relativer Luftfeuchte

„Kapillarkondensation“ in den Poren des Baustoffs). Dies entspricht einer Temperatur von 12,6°C. Daher dürfen offenporige Oberflächen diesen Wert nicht unterschreiten (Anforderungen der DIN 4108-2:2013-02 („Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“) und DIN EN ISO 13788:2012 („Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren“).

Zur Beurteilung der Oberflächentemperatur wird für festgelegte thermische Randbedingungen im stationären Zustand der Temperaturfaktor

$$f_{Rsi} = (\Theta_{si} - \Theta_e) / (\Theta_i - \Theta_e)$$

definiert. Dabei ist die Innenlufttemperatur $\Theta_i = 20^\circ\text{C}$ und die Außenlufttemperatur $\Theta_e = -5^\circ\text{C}$. Für die geforderte Mindestoberflächentemperatur $\Theta_{si} = 12,6^\circ\text{C}$ bei einer Luftfeuchte von $\phi = 50\%$ im Raum findet man dann die Bedingung $f_{Rsi} > 0,7$. Mithilfe dieses Parameters lassen sich auch thermisch berechnete Wärmebrücken charakterisieren (DIN EN ISO 10211, siehe 3.3.5).

Die Folge sind z. B. mürbes Mauerwerk oder verfaultes Holz, sodass die Tragfähigkeit oder die Standsicherheit nicht mehr gewährleistet ist (manche Schimmelarten zersetzen organische Baustoffe und können damit ein statisches Versagen auslösen).²² Zudem stellt sich bei durchfeuchteten Bauteilen eine höhere Wärmeleitfähigkeit ein, wodurch man eine Verstärkung des Wärmebrückeneffekts erhält und die Innenoberfläche noch weiter abkühlt.²³

22 Gärtner, Gabriele; Lotz, Antje (2010): Wärmeschutz in der Praxis. Energetische Optimierung von Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (Basiswissen Bauphysik).

23 Krätschell, Michael; Anders, Frank (2012): Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, 32).

Durch konstruktive Maßnahmen lassen sich viele Wärmebrücken vermeiden bzw. minimieren.²⁴

Entsprechend der Fragestellung wird in den DIN-Normen von verschiedenen Übergangswiderständen ausgegangen. Tab. 5 zeigt eine Übersicht. Je höher der raumseitige Übergangswiderstand R_{si} ist, desto niedriger wird die Oberflächentemperatur. Gerade bei der Schimmelpilzgefahr wird der raumseitige Übergangswiderstand höher angesetzt, um der größeren Schimmelpilzgefahr in Bereichen mit geringer Luftbewegung in

24 Feldmann, Rainer; Becker, Thomas (2008): Wärmebrücken in der Bestandssanierung – Leitfaden für Fachplaner im Gebäudebereich. Deutsche Energie-Agentur. Berlin.



Abb. 77 Thermogramm eines Gebäudes des Plato-Wild-Ensembles mit erkennbaren Wärmebrücken im Bereich der Fensterstürze bzw. Rollladenelementen und schlecht gedämmten Fassadenteilen (Foto: Steffens)

Ecken und hinter Mobiliar Rechnung zu tragen.

1.3.2 Tauwasser

Übermäßige Feuchte in den Bauteilen gefährdet die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit eines Gebäudes, wie schon im letzten Abschnitt diskutiert wurde. Die Planung und Umsetzung eines mängelfreien Wärmeschutzes erfordert grundlegende Kenntnisse über die Entstehung und die Vermeidung von Tauwasser.

Zur sicheren Vermeidung von Tauwasserbildung bzw. Bauschäden infolge einer zu hohen Raumluftfeuchte muss der Raum regelmäßig gelüftet werden. Ohne mechanische Lüftungsanlage muss der Nutzer die erforderliche Lüftungsintensität selbst an den Grad seiner Feuchteproduktion anpassen. Dies stellt ein Problem im Bereich des Geschosswohnungsbaus dar, weil viele Nutzer über korrektes Lüften zu wenig Bescheid wissen (vgl. Kapitel C „Sozialstudie“).

Aus gesundheitlichen Gründen sollte bei der Lüftung von Wohnräumen die relative Luftfeuchte im Winter immer über 40% liegen. Werte zwischen 45% und maximal 50% relativer Luftfeuchte sind nach Krätschell und Anders (2010)²⁵ optimal. Während der Heizperiode sollte das Absinken der Luftfeuchte unter 30%

²⁵ Krätschell, Michael; Anders, Frank (2012): Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, 32).

Wärmeübergangswiderstände für Wärme- und Feuchtschutzberechnungen und zur Berücksichtigung der Gefahr von Schimmelpilz-Wachstum

Wärmeschutzberechnung DIN EN ISO 6946:2003

[m ² K/W]	Richtung des Wärmestroms		
	aufwärts	horizontal	abwärts
R _{si} (raumseitig/innen)	0,10	0,13	0,17
R _{se} (außenseitig)	0,04	0,04	0,04

Feuchtschutzberechnung (Tauwasser im Bauteilinneren) DIN 4108-3:2001

[m ² K/W]	Richtung des Wärmestroms		
	aufwärts	horizontal	abwärts
R _{si}	0,10	0,13	0,17
R _{se}	0,04	0,04	0,04
R _{se} an belüftete Luftschicht	0,08	0,08	0,08
R _{se} ans Erdreich	0,00	0,00	0,00

* z.B. hinterlüftete Fassade

Wärmebrückenberechnung zur Risikobewertung für Schimmelpilzbildung DIN 4108-2:2013 und DIN EN ISO 13788

[m ² K/W]	für alle Richtungen des Wärmestroms		
	unbeheizte Räume*	beheizte Räume	Fensterrahmen**
R _{si}	0,17	0,25	0,13
R _{se}	0,04	0,04	0,04
R _{se} ans Erdreich	0,00	0,00	0,00

* nur DIN 4108-2

**nur DIN EN ISO 13788

Tab. 5 Wärmeübergangswiderstände aus den DIN-Normen zur Berechnung von Wärmeschutz, Feuchtschutz (Tauwasser) und Schimmelpilzgefahr von Bauteilen und Wärmebrücken

vermieden werden. Eine zu niedrige Luftfeuchtigkeit führt zur Austrocknung der Schleimhäute und Reizerscheinungen in den Atemwegen sowie einer erhöhten Infektionsgefahr.

Neben der Feuchteabfuhr durch Lüftung muss eine ausreichende Beheizung erfolgen. Sowohl auf der Bauteiloberfläche als auch im Bauteil darf die Taupunkttemperatur im Winter nicht dauerhaft unterschritten werden. Dies sollte im Planungsprozess durch die Technischen Baubestimmungen (DIN 4108-2) mithilfe von Mindestdämmstandards, aber auch durch mehrdimensionale, instationäre (also zeitabhängige) wärme- und feuchtegekoppelte Bauteilsimulationen (siehe Abschnitt 3.4) im Detail sichergestellt werden.

Aufgrund des hohen Temperaturgefälles von innen nach außen ist eine Tauwasserbildung innerhalb eines Bauteils nie völlig ausgeschlossen. Insbesondere bei Innendämmung ist dies sogar der Regelfall. Daher wird in den Regelwerken lediglich von einer möglichst geringen, auf ein unschädliches Maß begrenzten Tauwasserbildung gesprochen.

Wasserdampf-Diffusion durch Bauteile

Besteht zwischen den beiden Oberflächen eines Bauteils ein Unterschied in der Wasserdampfkonzentration in der Luft, was unterschiedlichen Wasserdampf-Partialdrücken (p) entspricht, so kommt ein Wasserdampf-Diffusionsstrom durch das Bauteil zustande. Dieser Feuchtestrom ist proportional zum Partialdruckunterschied und indirekt proportional zum Diffusionswiderstand Z des Bauteils. Bezogen auf Luft kann der vorhandenen Bauteildicke s eine äquivalente Luftschichtdicke $s_d = \mu s$ zugeordnet werden, die denselben Diffusionswiderstand liefert. Der Umrechnungsfaktor wird als Krischer'sche Diffusionswiderstandszahl μ bezeichnet. Der Diffusionswiderstand eines Bauteils aus n Schichten errechnet sich aus der Summe der äquivalenten Luftschichtdicken $\mu_k s_k$ ($k = 1$ bis n).

Dann ergibt sich bei einem Partialdruckgefälle $p_i - p_e$ zwischen der inneren und äußeren Oberfläche der Feuchtestrom g , bezogen auf 1 m^2 des Bauteils, in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$:

$$g = \frac{p_i - p_e}{Z} \quad \text{mit } Z = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Pa} \cdot \text{h} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \sum_{k=1}^n \mu_k s_k$$

Der Partialdruck fällt über die äquivalente Luftschichtdicke des Bauteils gleichmäßig linear ab, sofern sein Wert nicht den lokalen Sättigungsdruck erreicht. Genau dies passiert jedoch, wenn infolge eines starken Temperaturabfalls über das Bauteil der Sättigungsdruck zu stark abfällt.

Dann kann der Partialdruck nicht mehr einer geraden Linie folgen, sondern muss gekrümmt verlaufen; in einer vereinfachten Darstellung kann man den Verlauf durch einen geknickten Linienzug approximieren. An der Knickstelle herrscht 100% relative Feuchte mit Partialdruck p_z (Tauwasserbildung).

Innerhalb bzw. außerhalb dieser Knickstelle im Bauteil hat man die Diffusionswiderstände Z_i bzw. Z_e (gebildet aus den jeweiligen Bauteilschichten), und man erhält unterschiedliche Feuchtestrome innen (g_i) und außen (g_e),

$$g_i = (p_i - p_z)/Z_i \quad \text{und} \quad g_e = (p_z - p_e)/Z_e,$$

deren Differenz die anfallende Tauwassermenge g_t pro Zeit darstellt:

$$g_t = g_i - g_e \quad \text{in } \text{kg}/(\text{m}^2\text{h}).$$

1.3.3 Feuchtetransport durch Bauteile

Feuchte kann mittels Diffusion, laminarer Luftströmung, kapillarer Wasserwanderung oder elektrokinetischer Einflüsse (Osmose) in ein Bauteil eindringen.²⁶

Wasserdampf-Diffusion

Wasserdampf-Diffusion ist vom Ort höheren Wasserdampfgehalts (bzw. Partialdrucks) zum Ort niedrigeren Wasserdampfgehalts gerichtet. Es handelt sich um einen langsamen, statistischen Transportprozess durch die thermische Bewegung der Wassermoleküle. Der Vorgang ist vor allem im Winter von Bedeutung, weil in beheizten Räumen der Wasserdampfgehalt höher ist als in der kalten Außenluft. Dadurch wird Feuchte von innen ins Bauteil eingebracht. Da die Temperatur im Bauteil nach außen hin abfällt, kann es zu Tauwasserbildung kommen, wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Die Diffusion wird durch den Diffusionswiderstand der Baustoffe begrenzt. Dieser lässt sich durch die „diffusionsäquivalente Luftschichtdicke“ s_d des Bauteils beschreiben (siehe Infobox).

Zur Vermeidung von Tauwasserbildungen im Bauteilquerschnitt müssen diese dampfdiffusionstechnisch richtig aufgebaut und insbesondere luftdicht ausgebildet sein. Ein hoher s_d -Wert von innen liegenden Bauteilschichten (diffusionsbremsende Schichten) führt zu einer starken Absenkung des Partialdrucks und kann die

Tauwasserbildung unterbinden, diffusionsoffene innen liegende Schichten mit niedrigem s_d -Wert erhöhen das Risiko der Tauwasserbildung bzw. die zu erwartende Tauwassermenge. Problematisch sind Undichtigkeiten in der Ausführung von dampfbremsenden Schichten, weil hier eine hohe Gefahr des Hinterströmens der Schicht besteht.

Es stehen zur Sicherstellung der Tauwasserfreiheit von Außenbauteilen mehrere Nachweisverfahren zur Verfügung; in der DIN 4108-3 ist die als „Glaser-Verfahren“ bekannte Nachweismethode verankert (vgl. z.B. Fischer et al., 2008).²⁷ Allerdings wird in diesem Verfahren das Feuchtespeicherverhalten der Baumaterialien nicht berücksichtigt, sodass in der Praxis zunehmend instationäre thermisch-hygrische Bauteilsimulationen zur Anwendung kommen.

1.3.4 Kapillare Wasserwanderung

In den Poren (Kapillaren) von Baustoffen kann sich aufgrund der Oberflächenspannung Flüssigwasser durch Kondensation bilden, wodurch ein Wassertransport in Form von „Oberflächendiffusion“ in dünnen Wasserfilmen bis hin zu einem gesättigten Flüssigwassertransport in den gefüllten Kapillaren erfolgen kann. Dieser

²⁶ Lohmeyer, G. C. O.; Post, Matthias; Bergmann, Heinz (2010): Praktische Bauphysik. 7., überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

²⁷ Fischer, Heinz-Martin; Freymuth, Hanns; Häupl, Peter; Homann, Martin; Jenisch, Richard; Richter, Ekkehard; Stöhrer, Martin (2008): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 6., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 196–200.

Mechanismus ist in der Lage, ein Vielfaches der Feuchtemenge im Vergleich zur reinen Diffusion zu bewegen. Der Transport ist von Orten höherer relativer Feuchte zu Orten niedrigerer relativer Feuchte gerichtet.²⁸

Lohmeyer et al. (2010)²⁹ führen einige Beispiele auf, die in der Praxis von großer Bedeutung sind:

- aufsteigende Feuchte im Mauerwerk bei fehlender waagerechter Abdichtung
- nach innen wandernde Feuchte bei schlechter lotrechter Abdichtung im Erdreich
- nach innen wandernde Feuchte bei Außenwänden im Schlagregen
- kapillare Leitung von Tauwasser im Bauteil
- Feuchtespeicherung bei kurzfristig anfallender Feuchte in Küche, Bad etc. (Pufferwirkung)

Die rechnerische Behandlung von kapillarem Wassertransport kann durch hygrothermische (gekoppelte Wärme-Feuchte-)Simulationen, z. B. mit WUFI, mithilfe aktueller Materialdatenbanken durchgeführt werden.³⁰

1.3.5 Kapillaraktive Innendämmung

Nach Aufbringen einer innenseitigen Wärmedämmung liegen die Temperaturen in der Massivmauerwerkschicht deutlich niedriger als ohne Dämmung, was einerseits zu einem erhöhten Tauwasserrisiko führt, andererseits die von außen eindringende Niederschlagsfeuchte langsamer abtrocknen lässt.

Das Risiko der Feuchteanreicherung kann bei luftdichter Ausführung und flächiger Verklebung der Dämmschicht durch diffusionshemmende Dämmstoffe oder Faserdämmungen mit konventioneller Dampfbremse minimiert werden. Allerdings wird dabei das Trocknungspotenzial nach innen ebenfalls reduziert. Ausführungsbedingte Undichtigkeiten schaffen zudem ein unwägbares Risiko. Daher galt in der Vergangenheit

28 Häupl, Peter; Willems, Wolfgang J. (2013): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 7., vollst. überarb. und aktual. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 204.

29 Lohmeyer, G. C. O.; Post, Matthias; Bergmann, Heinz (2010): Praktische Bauphysik. 7., überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 219.

30 Binder, Andrea; Künzel, Hartwig; Zirkelbach, Daniel (2012): Ein abschätzender Blick in die Zukunft. Hydrothermische Simulationen. In: Bauen im Bestand B+B/Trockenbau Akustik Spezial, S. 11–17.

eine Innendämmung als bauphysikalisch ungünstig.

Für die Innendämmung stehen grundsätzlich drei unterschiedliche Varianten zur Verfügung:

- innenseitige Wärmedämmstoffe in Verbindung mit einer Dampfsperre und einer raumseitigen Plattenbekleidung
- dampfdichte Wärmedämmstoffe (z. B. Schaumglasdämmplatten)
- kapillaraktive Dämm- und Funktionsschichten ohne Verwendung von Dampfsperren (z. B. Calciumsilikatplatten, expandierte Perlite-Dämmplatten, Holzweichfaserdämmplatten, aufgeschäumte Mineralewolleplatten u. a.)³¹.

Während dampfdichte Innendämmungen infolge der niedrigeren Partialdruckverhältnisse im Bereich des Mauerwerks für eine Entschärfung der Situation sorgen (mit dem Risiko des Hinterströmens bei undicht ausgeführter Dämmung), müssen diffusionsoffene Dämmungen kapillaraktive Eigenschaften aufweisen, um den Abtransport anfallender Tauwassermengen (zurück in den Innenraum) zu gewährleisten.

Mit zunehmender relativer Luftfeuchte der Umgebung bildet sich die Oberflächendiffusion aus; wenn der Wassergehalt weiter steigt, kommt es zur Kapillarleitung infolge der kapillaren Saugspannung in den bereits vollständig mit Wasser gefüllten Poren. Dieser Effekt tritt zunächst in den kleineren Kapillaren auf, während sich die größeren noch im Oberflächendiffusionsmodus befinden. Beide Phänomene werden zusammenfassend als Kapillaraktivität bezeichnet.³²

Eine weitere Gefahr bei zu starker Innendämmung ist das Auskühlen von tragenden Holzbalken, die in das Mauerwerk ragen. Hier kann aufgrund der erhöhten relativen Luftfeuchte Schimmelbefall die Bausubstanz

31 Krätschell, Michael; Anders, Frank (2012): Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, 32).

32 Zirkelbach, Daniel; Binder, Andrea (2011): Mit neuen Kennwerten genauer rechnen. Kapillaraktive Innendämmungen. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (2), S. 42–47.

zerstören.^{33, 34, 35, 36} Hygrothermische Simulationen sind hier ein wichtiges Hilfsmittel, um Risiken auszuschließen.

Calciumsilikat-Dämmplatten

Eine mittlerweile in der Praxis erprobte Lösung dieses Problems wird im Einsatz einer kapillaraktiven Innendämmung auf Calciumsilikat-Basis gesehen.

Häupl et al. (2003)³⁷ haben dieses Material als innenseitig in Form aufgeklebter Platten angebrachte Dämmschicht untersucht. Diese werden in einem energieintensiven Prozess (Nasspressen, Autoclave, Trocknen) aus CaO, SiO₂, Zellulosefasern und Wasser hergestellt. Die erhaltene Feststoffmatrix wurde bisher genutzt für die Isolation von Hochöfen, im Bereich der Metallgießerei und für den Brandschutz (1 100 °C). Die Platten haben eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, eine hohe Kapillaraktivität und günstige Feuchtespeichereigenschaften für 40 bis 80 % rel. Feuchte. Das alkalische Milieu mit einem pH-Wert von über 10 erhöht zudem den Schutz vor Schimmelpilzwachstum.

In den kalten Monaten erzeugt das Temperatur- und Dampfdruckgefälle einen Wärme- bzw. Dampfstrom von innen nach außen. Innerhalb des Bauteils kommt es dann zur Kondensation, wenn der berechnete Wasserdampfdruck den direkt von der Temperatur abhängenden Sättigungsdruck überschreitet. Dies geschieht in der Regel auf der kalten Seite der Innendämmung. Sobald Tauwasser in der Konstruktion entsteht, setzt kapillares Saugen ein, wodurch das Wasser großflächig verteilt wird. Der Wandaufbau von innen nach außen besteht aus der kapillaraktiven Dämmplatte, dem Klebemörtel, der Massivwand und dem Außenputz. Die flächige Verbindung des Klebemörtels mit der vorhandenen Bausubstanz ist entscheidend, um Tauwasserbildung in einem Luftspalt zwischen Dämmschicht und Massivwand zu vermeiden.

33 Adriaans, Heinrich: Bauphysikalische und raumklimatische Betrachtungen in historischen Gebäuden – Holzbalkenköpfe und Innendämmung.

34 Kehl, Daniel (2012): Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse. In: Holzbau Quadriga (6), S. 40–44.

35 Ruisinger, Ulrich (2011): Risikofaktor Balkenkopf? Holzbalkendecken und die Innendämmung. In: Holzbau (1), S. 18–22.

36 Ruisinger, Ulrich; Kautsch, Peter; Plagge, Rudolf (2012): Und es funktioniert doch! Innendämmung trotz Holzbalkenköpfen. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (4), S. 56–59.

37 Häupl, Peter; Fechner, Heiko; Jurk, Karsten; Petzold, H.; Stopp, H.; Finkenstein, C. (2003): Entwicklung leistungsfähiger Wärmedämmsysteme mit wirksamem physikalischen Feuchteschutz. Abschlussbericht Projekt Nr. 0329663B/0, BEO (Projekträger). Forschungszentrum Jülich.

Ruisinger et al. (2004)³⁸ erhalten aus Simulationsrechnungen ohne Berücksichtigung der Kapillarität im Fall einer Ziegelwand bis zu 2,3 kg/m² Tauwasser, unter Einbeziehung des Kapillarwassertransports dagegen max. 0,66 kg/m². Diese deutliche Reduktion durch Kapillaraktivität wurde auch in mehreren Testhäusern nachgewiesen. Die empirischen Untersuchungen zeigen, dass in der ersten Heizperiode eine Austrocknung der Einbaufeuchte (Klebemörtel) stattfindet. Dabei betragen die relativen Luftfeuchten im Winkelbereich noch bis zu 85 % (langsamere Austrocknung), in der zweiten Heizperiode nur noch ca. 65 %. In Abstimmung mit ihren Simulationen empfehlen die Autoren eine Dämmstärke von 5 cm.

Für die im Plato-Wild-Ensemble eingesetzte Innendämmung wurden für die kritischen Details hygrothermische Simulationen mit WUFI³⁹ durchgeführt, die in Abschnitt 3 diskutiert werden.

38 Ruisinger, Ulrich; Petzold, Hans; Grunewald, John; Häupl, Peter (2004): Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat. In: Landesregierung Thüringen (Hg.): Tagungsband Energiefachtagung. Bauhaus-Universität Weimar.

39 Künzel, Hartwig (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart.

2. Bestandsanalyse und Bauschäden

2.1 Risse und Feuchteschäden

Im Zuge der Bauaufnahme entstand eine umfassende Fotodokumentation von Bauschäden und Feuchteschäden. Exemplarische Messungen des Innenraumklimas über mehrere Tage hinweg belegen ein hohes Schimmelpilzrisiko in den Wohnräumen, das auch durch das Nutzerverhalten beeinflusst wird.

Bau- und Feuchteschäden an Sockel, Putz, Dachkonstruktion, Keller und Innenräumen wurden fotografisch dokumentiert und in einem Schadenskatalog zusammengestellt und bewertet.^{40, 41, 42}

Die Risse in den Mauerwerksaußenwänden und Schäden im Natursteinsockelbereich werden dokumentiert, auf einem Plan verortet und hinsichtlich der Schadensursachen klassifiziert. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann ein angemessenes Instandset-

40 Semmler, Thomas; Cemedanov, Sandra (2014): Bestandsmodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Bauschadensanalyse an Sockel, Fassade, Mauerwerk. Master-Projektarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

41 Licha, Maximilian; Wallner, Christian; Ziegler, Thomas (2014): Bestandsmodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Schimmel in Wohnräumen, Raumklima. Master-Projektarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

42 Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.



Abb. 78 Dehnungsriß (konstruktiv bedingter, vertikal verlaufender Riss vom Ringbalken abwärts)
(Foto: Semmler/Cemedanov)

zungskonzept entwickelt werden, das alle Faktoren (Denkmalschutz, Bauteilfunktion und Kosten) berücksichtigt.

2.1.1 Risse in der Fassade

Risse im Mauerwerk alter Gebäude haben oftmals mehrere Ursachen und lassen sich in der Literatur entsprechend katalogisieren.^{43, 44} Zur Unterscheidung der Rissarten und deren Ursachen gibt es vier Gruppen (Tab. 6): baugrundbedingte, konstruktiv bedingte, untergrundbedingte und putzbedingte Risse (Frössel 2009):⁴⁵

- Bei nicht oder nur gering bindigen Böden ist eine spätere Setzung in der Regel nicht zu erwarten. Der Boden besitzt ein Lastsetzungsverhalten, d.h., die größten Setzungen sind während der Rohbauphase zu erwarten. Nachträgliche Setzungen sind in der Regel so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Feinkörnige bzw. stark bindige Böden besitzen zusätzlich zu dem bereits erwähnten Lastsetzungsverhalten noch ein Zeitsetzungsverhalten. Flachgegründete Bauwerke können daher auch Jahrzehnte nach Fertigstellung noch Setzungen aufweisen, die stark von den Wasserverhältnissen im Untergrund abhängen (z.B. Schwindsetzung bei Austrocknung des Bodens). Stark sandige Böden, die aus locker gelagertem Material bestehen, sind extrem erschütterungsempfindlich, d.h. dass es zum Beispiel durch Erschütterungen in der näheren Umgebung (z.B. Gründungsarbeiten beim Nachbarhaus) zu Setzungen kommen kann.
- Konstruktiv bedingte Risse haben ihren Ursprung in der Konstruktionsebene bzw. dem Bauteil und werden durch den Verbund auch auf angrenzende Bauteile übertragen. Die Ursachen sind meistens äußere Lasteinwirkungen und lastunabhängige Verformungen, wie Setzungen, Durchbiegungen aufgrund von Eigengewicht, Feuchtehaushalt oder Temperatur. Für die dabei entstehenden Risse gibt es jeweils sehr unterschiedliche und typische Rissbilder, wie sie auch am Plato-Wild-Ensemble festgestellt werden konnten. Man unterscheidet:

43 Schubert, P. (2002): Schadenfreies Bauen mit Mauerwerk – Katalog von Risschäden und Maßnahmen zu deren Vermeidung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

44 Schubert, Peter (2004): Mauerwerk – Risse vermeiden und instandsetzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

45 Frössel, Frank (2009): Risse in Gebäuden. Damit aus einer Fassade kein Ris(s)iko wird. 1. Aufl., unveränd. Nachdr. Waldshut-Tiengen: Baulino Verlag; Baulino, S. 196–290.



Abb. 79 Auszug aus dem Schadenskatalog mit Lageplan zur Verortung der Rissbilder
 Quelle: Semmler, Thomas; Cemedanov, Sandra (2014)



a) vertikal verzahnte Risse, welche zumeist durch Schwinden oder Ausdehnen des Ringbalkens oberhalb des Mauerwerks verursacht werden (Abb. 78), d.h. durch unterschiedliche Längenänderungen benachbarter Bauteilkomponenten;
 b) schräge, abgestufte Risse als Folge von Schubspannungen, die beispielsweise bei der Verwendung von unterschiedlichen Mauersteinen für Außen- und Innenmauerwerk entstehen können;
 c) horizontale Risse, die sehr häufig aus Deckendurchbiegungen resultieren. Letztere entstehen, wenn sich die Decke z.B. aufgrund ihres Eigengewichts stark durchbiegt. Dann bildet sich am Mauerwerksauflager eine klaffende Fuge zwischen Decke und Mauerwerk, welche in der Regel als horizontaler Riss sichtbar wird.

- Der Untergrund oder auch Putzträger stellt die tragende Schicht für die nachfolgende Beschichtung dar. Darunter fällt eine Vielzahl von Werkstoffen (Kalkstein, Sandstein, Beton, Holz, Gips, Leichtbauplatten usw.). Aber auch Putze, wie etwa Kalkputze, Zementputze, Lehmputze, Sanierputze und viele mehr, können wiederum als Untergrund bzw. als „Unterputz“ für den Oberputz dienen. Der Oberputz wiederum dient meistens als Untergrund für die Anstriche, die meistens mehrschichtig sind und somit für sich selbst wieder ein Untergrund für die nächste Schicht sind. Untergrundbedingte Risse sind somit ein Grenzflächenthema zwischen zwei aneinander grenzenden Schichten. Sie müssen nicht durch alle Schichten und Tiefen verlaufen. Ursächlich sind die Materialeigenschaften Saugfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit des Untergrunds (Volumenänderung aufgrund von Wasseraufnahme/Quellen oder Wasserabgabe/Schwinden und temperaturbedingte Volumenänderungen, aber auch handwerkliche Mängel wie z. B. nicht fachgerech-



Abb. 80 Kerbriss am Plato-Wild-Ensemble (Foto: Semmler/Cemodanov)

te Mauerwerksfugen führen dazu, dass aufgrund der unterschiedlichen Putzdicke und der daraus resultierenden Aushärtungszeit Risse provoziert werden. Eine genaue Unterscheidung konstruktiv bedingter und untergrundbedingter Risse ist oftmals nicht so einfach, da sich in den meisten Fällen deren Ursachen überlagern. Dafür typisch sind Risse mit sich überlagernden Ursachen wie z.B. Kerbrisse, Fugenrisse und Stein-Putz-Risse. Kerbrisse treten meist als diagonal verlaufende Risse auf, die am häufigsten bei Mauerwerköffnungen im Eckbereich entstehen. Wenn die Risse im Steinfugenbereich verlaufen, sind diese eher linienförmig; im Fugenbereich zwischen den Mauersteinen verlaufen sie zickzackförmig. Überlagern sich vertikale Druckspannungen mit den horizontal verlaufenden Zugspannungen, kommt es zu Spannungsspitzen, die im Eckbereich am größten sind. Infolge dessen entsteht an der schwächsten Stelle des Mauerwerks ein Riss, der sich in diagonalen Richtung fortsetzt. Es kann auch vorkommen, dass ein vertikaler Riss in der Mitte des Brüstungsbereichs auftritt (Abb. 80).

Rissart	baugrundbedingt	konstruktiv bedingt	untergrundbedingt	putzbedingt
Ursachen	Baugrund	Äußere Lasteinwirkungen	Untergrund	Sackrisse
	- nicht oder gering bindig	Lastunabhängige Verformungen	- Saugfähigkeit	- weiche Putzkonsistenz
	- feinkörnig/stark bindig	- Setzungen	- Wärmeleitfähigkeit	- zu lang eingerieben
	- stark sandig	- Durchbiegungen	- Festigkeit	Schwindrisse
	Lastsetzungen	- Schwinden	Kerbrisse	- schlechte Nachbehandlung
	Zeitsetzungen	- Temperatur	- Öffnungen im Mauerwerk	- Verdunstung
	Grundwasserspiegel	- Kriechen	Fugenrisse	Fettrisse
	Erdbeben		- schlechte Verfugung/Putz	- zu starkes Glätten der Oberfläche
	Unterspülungen		Stein-Putz-Risse	
	Verwurzelung (Bäume)		- Temperatur, Feuchte	
fehlerhafte Planung				

Tab. 6 Übersicht der Rissarten und deren Ursachen. Nach Frössel, Frank (2009): Risse in Gebäuden. Damit aus einer Fassade kein Ris(s)iko wird. 1. Aufl., unveränd. Nachdr. Waldshut-Tiengen: Baulino Verlag; Baulino.

Fugenrisse sind sehr regelmäßig und spiegeln zumeist den Fugenverlauf des Untergrundes wider. In der Regel kann man diese Art von Rissen bei einem Untergrund aus Mauerwerk beobachten, jedoch auch auf Dämmplatten eines Vollwärmeschutzes. Fugenrisse entstehen innerhalb der ersten zwei Jahre und können sich mit Schwindrissen oder aber auch konstruktiv bedingten Rissen überlagern, woraus nicht mehr ganz so eindeutige Rissbilder entstehen. Deshalb müssen Fugenrisse nach Frössel (2009)⁴⁶ bei genauerer Analyse zwischen untergrundbedingten und putzbedingten Ursachen unterschieden werden. Temperaturvariationen auf der Außenseite von hoch wärmedämmenden Mauerwerken mit sehr dünnwandigen Ziegeln führen zu stärkeren Verformungen der Steine auf der Außenseite im Verhältnis zur Innenseite. Durch die außenseitigen Dehnungen bzw. Verkürzungen zeichnet sich das Fugenbild im Putz ab, sog. Stein-Putz-Risse entstehen. (Dieses Phänomen kann bei Bestandsgebäuden der 1920er-Jahre nicht auftreten.)

- Putzbedingte Risse beschränken sich auf das Putzsystem selbst. Sie treten schon relativ früh (innerhalb der ersten sechs Monate) auf. Die komplexen Anforderungen an ein Putzsystem sind z. B. von Hartmann (2013)⁴⁷ dargestellt. Zur besseren Klassifizierung gibt es eine Einteilung der verschiedenen Rissarten in Sackrisse, Schrumpfrisse, Schwindrisse und Fettrisse (siehe Tab. 6). Am Plato-Wild-Ensemble wurden putzspezifische (historische) Rissbilder nicht identifiziert.

Konstruktiv bedingte Risse zeigen sich meistens erst nach sechs Monaten bis hin zu fünf Jahren nach Fertigstellung. Es ist durchaus möglich, dass die vorgefundenen Risse am Plato-Wild-Ensemble schon 80 Jahre und älter sind. Selbst wenn dies nicht der Fall ist, liegt die Vermutung nahe, dass zumindest ein Teil der Risse auf die Konstruktion, speziell auf Ausdehnungen aus dem Ringbalken, zurückzuführen ist. Am Plato-Wild-Ensemble wurden an vielen Stellen Risse entdeckt, die ganz oben am Gebäude beginnen und bis unten durchlaufen, ihren Ursprung somit vermutlich in Längenänderungen im Ringbalken haben. Diese Risse verlaufen von ganz oben bis unten und wandern über die Schwachstellen im Mauerwerk, insbesondere die Eckbereiche von Fenster- und Türöffnungen.

46 Frössel, Frank (2009): Risse in Gebäuden. Damit aus einer Fassade kein Ris(s)iko wird. 1. Aufl., unveränd. Nachdr. Waldshut-Tiengen: Baulino Verlag; Baulino.

47 Hartmann, Oliver (2013): Besser vorbeugen als nur Symptome bekämpfen. Putzrisse erkennen, analysieren und sanieren. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (5), S. 16–19.

Schadenskartierung

Der Kartierung und genauen Verortung von Bauschäden kommt bei der Schadenserfassung eine wichtige Rolle zu.⁴⁸ Für das Plato-Wild-Ensemble wurde eine einfache, aber effektive Methode zur Darstellung der vorhandenen Schäden gewählt.⁴⁹ Anhand des Ampelprinzips wurden die Risschäden kategorisiert, wobei Rot für viele Schäden und großen Sanierungsaufwand steht, während Grün für Schadensfreiheit und keinerlei Sanierungsbedarf steht.

Bei der Besichtigung des Plato-Wild-Ensembles und der durchgeführten Schadenskartierung der Risse sind immer wieder die gleichen Schadensbilder aufgefallen, in der Regel konstruktiv bedingte Dehnungsrisse und untergrundbedingte Kerbrisse. Diese Risse treten zumeist in den ersten Jahren nach Fertigstellung auf, sie könnten also durchaus seit den 1920er-Jahren bestehen. Abb. 79 zeigt einen Auszug aus dem Schadenskatalog.

Weitergehende Analysen und Instandsetzung

Um letztendlich herauszufinden, welche Ursachen nun tatsächlich für die Risse verantwortlich sind und über welchen Zeitraum sie sich entwickeln, muss eine genaue Analyse vorgenommen werden. Dabei werden die Risse mit einem Rissmaßstab versehen, kontrolliert und für eine spätere Dokumentation fotografiert und festgehalten. Wie Frössel (2009) beschreibt, können Risse unter 0,2 mm Breite mit einer rissüberbrückenden Beschichtung geschlossen werden, breitere Risse müssen jedoch durch Füllen oder Injizieren verschlossen werden.

Stichprobenartig kann an vereinzelt Stellen der Putz abgeschlagen oder aufgebohrt werden, um zu kontrollieren, bis in welche Schicht der Riss vordringt.

Besonders sollte vor einer Instandsetzung geprüft werden, ob die Risse noch in Bewegung sind. Dies kann mithilfe einer Gipsmarke oder eines Rissmonitors nachgewiesen werden, welcher über dem Riss angebracht wird. Mithilfe moderner Rissmessgeräte erhält man nicht nur die Information, ob der Riss in Bewegung ist, sondern man kann auch messen, wie stark sich der Riss verändert hat.

48 Schäfer, Hermann (2013): Von A bis Z die Übersicht behalten. Digitale Unterstützung bei der Bauwerkskartierung. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (5), S. 36–40.

49 Semmler, Thomas; Cemodanov, Sandra (2014): Bestandsmodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Bauschadensanalyse an Sockel, Fassade, Mauerwerk. Master-Projektarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.



Abb. 81 Intakte Sockelmauer im Bereich von Grünflächen und Kiesschüttung (Fotos: Semmler/Cemodanov)

Meist sind kosmetische Reparaturen von Rissen (schnelles Verspachteln) nicht von langer Dauer. An manchen Rissen lassen sich auch frühere Reparaturversuche erkennen. Die Risse müssen fachgerecht behandelt werden. Eine Möglichkeit zur Sanierung der Risse im Außenmauerwerk ist die Rissinjektion. Diese erfolgt durch Verpressen des Risses unter Druck, mithilfe von sog. Packern geschehen. Diese werden abwechselnd links und rechts entlang des Risses angebracht. Zuvor werden Löcher diagonal von rechts nach links bzw. von links nach rechts verlaufend vorgebohrt, durch die später das Injektionsmittel eingepresst wird. In die vorgebohrten Löcher werden die Packer eingebohrt und verspannt, geklebt oder eingeschlagen. Anschließend werden an den Packern die Injektionsschläuche angebracht und mittels einer Verpressmaschine die Risse unter Druck verschlossen. Dadurch wird gewährleistet, dass auch der kleinste Riss und Hohlraum verschlossen wird.

Ruhende Risse lassen sich kraftschlüssig mittels eines Zementleims verschließen. Dieser wird im sogenannten Niederdruckverfahren eingebracht. Wenn die Risse sich allerdings stetig bewegen, ist eine Rissinjektion mit einem elastischen Injektionsharz zu empfehlen.

Nachdem das Injektionsgut ausgehärtet ist, sollte ein rissüberbrückendes Putzsystem über dem Riss angebracht werden. Dazu muss der Putz entlang des Risses im Umkreis von ca. 20 cm abgefräst oder abgeschlagen, ein Haftgrund aufgebracht und anschließend ein rissüberbrückendes Gewebe eingeputzt werden. Dadurch können kleinere Bewegungen und Spannungen im Riss und Putzsystem aufgefangen und ein erneutes Aufreißen verhindert werden.

Eine weitere Möglichkeit der Rissanierung bietet der Einbau eines Spiralankers. Dieser besteht aus austenitischem Edelstahl, der gewalzt und verdrillt wird. Dieses System weist eine hohe Zugtragfähigkeit und hinreichend elastisches Verhalten auf. Es kann für ruhende Risse verwendet werden, es kann aber ebenso bei beweglichen Rissen eingesetzt werden.

2.1.2 Sockelschäden

Baumaterialien im Bereich von Straßen und Gehwegen sind besonderen Beanspruchungen durch Spritzwasser, Tausalze, Harn und mechanische Kräfte ausgesetzt. Dies kann im Laufe der Zeit zu Schäden führen, wie sie auch am Plato-Wild-Ensemble zu beobachten sind. Die meisten schwärzlichen Verfärbungen des Natursteins sind harmlos und auf Hundeharn zurückzuführen. Neben diesen ästhetischen Beeinträchtigungen konnten jedoch auch Schäden, deren Ursprung auf Tausalze und Frost zurückgeführt werden muss, festgestellt werden.

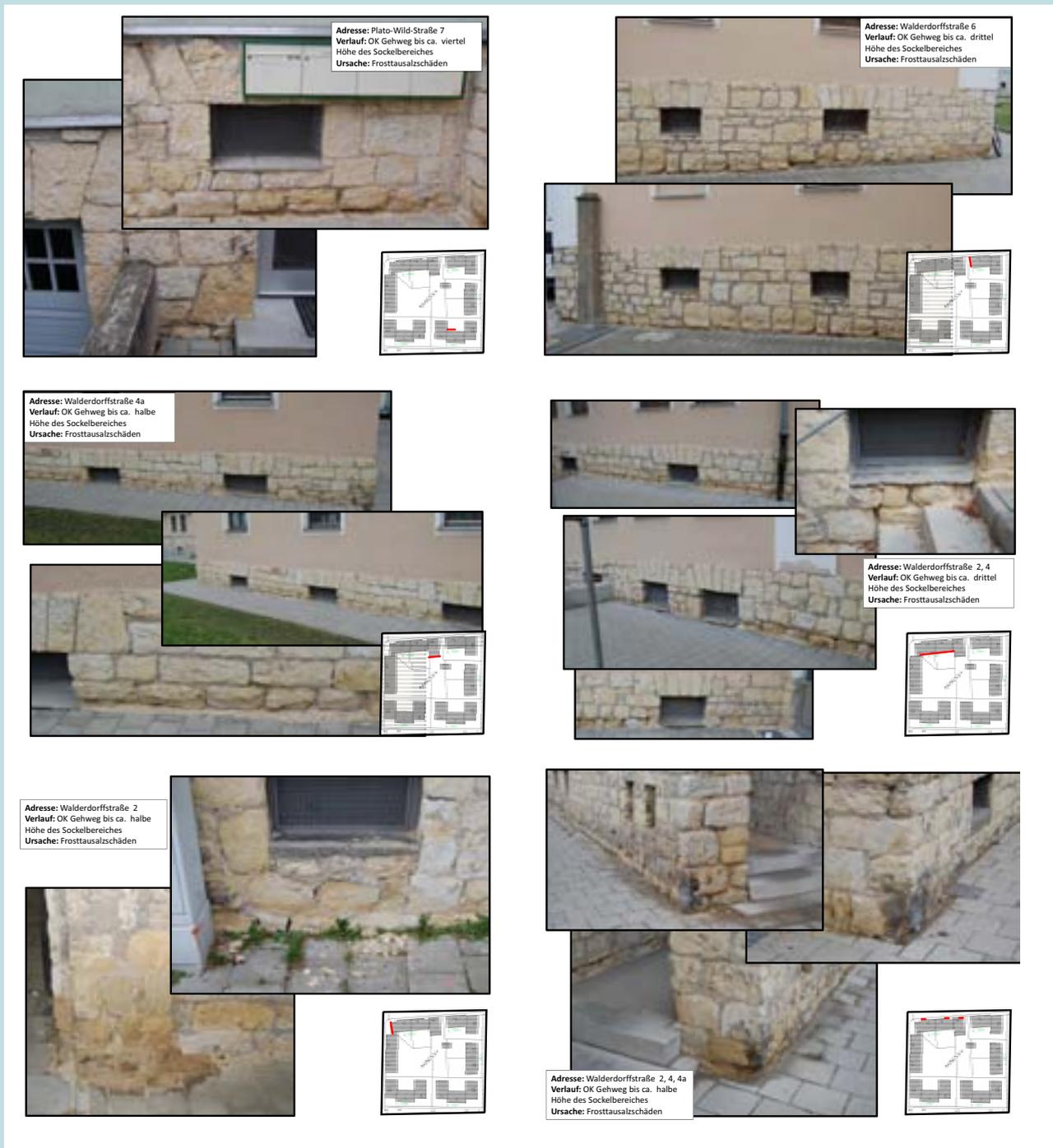
Die vorgefundenen Schäden wurden kartiert und nach dem Ampelprinzip eingestuft, um anschließend ein Instandsetzungskonzept zu entwickeln. Die Einordnung der Schadensklasse rot bis grün erfolgte anhand der Häufigkeit und dem Zerstörungsgrad des Sockelbereichs, Beispiele aus dem Schadenskatalog zeigt Abb. 82.

Am Plato-Wild-Ensemble wurde im Sockelbereich hauptsächlich Sandstein verbaut (Abb. 83), an manchen Häusern aber auch Travertin. Travertin ist ein poröser Kalkstein von gelblicher bis brauner Farbe, der fast ausschließlich aus Calciumcarbonat besteht. Er ist trotz seines hohen Wassergehalts von 0,3 bis 3,0 Masseprozent frostfest. In saurem Milieu wird er jedoch schnell angewittert.

Die Kenntnis über die vorliegende Steinsorte ist nach Schrepfer und Gscheidle (2007)⁵⁰ essenziell: „Abhängig von der Exposition des Natursteins am Bauwerk und dem verbauten Natursteinmaterial ist eine Vielzahl an Schäden bekannt. Dabei ist vor allem zu beachten, dass aus einem Schadensbild ohne Kenntnis des verbauten Natursteinmaterials nicht auf die Schadensursache geschlossen werden kann.“

Die vorgefundenen Schäden traten alle beim Sandstein auf und wiesen alle ein ähnliches Schadensbild

⁵⁰ Schrepfer, Thomas; Gscheidle, Harald (2007): Schäden beim Bauen im Bestand. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Schadenfreies Bauen, 41), S. 184.



D

Abb. 82 Auszug aus dem Schadenskatalog für die Natursteinsockelmauern
 Quelle: Semmler, Thomas; Cemodanov, Sandra (2014)



Bestandsanalyse und Bauschäden



Abb. 83 Schäden am Sandsteinsockel im Bereich von Hauseingängen, Treppen und Gehwegen (Fotos: Semmler/Cemodanov)

auf. Schrepfer und Gscheidle (2007) nennen folgende für Natursteine typische Schadensbilder:

- Absanden (Verwitterung)
- Abblättern (Schichtenbildung)
- Abspregungen
- Ausblühungen
- Krustenbildung

Die am Plato-Wild-Ensemble vorgefundenen Schäden können gemäß dieser Einordnung in die Kategorie Absanden und Abspregungen eingeordnet werden. Die Oberflächen der Steine versanden zunehmend mit den Jahren, die Abspregungen durch gefrierendes Wasser und austrocknende Salze unterstützen diesen Prozess. Dies liegt sehr wahrscheinlich auch an den für den Sockelbereich ungünstigen bzw. ungeeigneten Eigenschaften des Sandsteins. Er besitzt eine sehr hohe kapillare Saugfähigkeit und verfügt darüber hinaus noch über eine extrem hohe Speicherfähigkeit von Wasser. Diese Eigenschaften bieten die optimalen Voraussetzungen für Frostabplatzungen und Frostschäden, die durch Volumenausdehnung des gefrierenden Wassers in den Poren des Sandsteins entstehen.

Die vorgefundenen Schäden im Sockelbereich liegen



Abb. 84 Sockelmauer aus Sandstein (Foto: Semmler/Cemodanov)

alle im unmittelbaren Verlauf von Gehwegen im Innenhof, an Treppen und im Bereich der öffentlichen Gehwege an der Straße (Abb. 84). Man beobachtet, dass die unteren zwei bis drei Steinreihen dunkler sind als die darüberliegenden. Dies ist ein Indiz für eine erhöhte Wasseraufnahme.

Die Verkehrswege müssen in den Wintermonaten von Schnee und Eis befreit werden. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass auch Tausalze bei den Schäden eine bedeutende, wenn nicht sogar die ausschlaggebende Rolle spielen. Diese bahnen sich beim Abtauen in wassergelöster Form ihren Weg in den Sandstein. Dort werden sie aufgrund der hohen Saug- und Speicherkapazität eingelagert. Egloffstein (2013)⁵¹ stellt dazu fest, dass „[...] spritzwassergefährdete Bereiche häufig mit Halit aus Streusalz belastet sind“. Halit ist ein beinahe farbloser, kubischer Salzkristall, der beim allmählichen Austrocknen des Wassers zurückbleibt. Dabei kommt es zu einer Volumenvergrößerung. Der damit verbundene Kristallisationsdruck führt schließlich zu Abplatzungen im Sandstein. Das Salz kann aufgrund seiner Hygroskopizität wieder Wasser einspeichern, wodurch es bei Kälte wiederum zu Frostschäden kommt.

Eine chemische Analyse der Anionen oder eine Röntgen-Diffraktometrie der Salzphase kann Aufschluss darüber geben, in welchem Umfang Streusalze bzw. Halit im Mauerwerk vorhanden sind.

Interessanterweise sind im Plato-Wild-Ensemble alle Stellen, wo kein Gehweg o.Ä. unmittelbar angrenzt, also neben Gras- und Kiesflächen, nahezu unbeschädigt (Abb. 81). Beide Bereiche liegen im Spritzwasserbereich, jedoch ist nur der Sandstein entlang der Verkehrswege betroffen. Dies deutet darauf hin, dass die Tausalze Verwitterung und Zerstörung der Sandsteine im Sockelbereich verursacht haben. Aufsteigende Feuchte aus dem Erdreich kann man ebenso wie Spritz-

⁵¹ Egloffstein, Petra (2013): Unerwünschte Würze. Flankierende Maßnahmen bei feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (6), S. 28–33.



Abb. 85 Horizontalsperre gegen aufsteigende Mauerwerksfeuchte (Foto: Semmler/Cemodanov)

wasser als alleinige Schadensursache ausschließen. Beide können jedoch fördernd im Zusammenwirken mit den Tausalzen zur Zerstörung des Sandsteins beitragen.

Begünstigt wird die Zerstörung des Sandsteins im Sockelbereich außerdem dadurch, dass die Fugen einen Allmählichkeitsschaden durch Verwitterung erleiden. Das Fugenmaterial wird mit der Zeit porös, bröckelt nach und nach aus der Fuge heraus und verliert seine abdichtende Funktion. Die dadurch entstehenden Hohlräume zwischen Fugennetz und Sandstein bieten ebenfalls ideale Voraussetzungen dafür, dass Wasser auch in die hinteren Regionen des Sandsteins vordringen kann und dort durch gefrierendes Wasser und eingebrachte Salze Schäden am Sandstein und im Fugennetz entstehen können.

Instandsetzung

Bei salzgeschädigtem Mauerwerk wird in der Regel ein Sanierputzsystem empfohlen.⁵² Zur Wahl des geeigneten

52 Kollmann, Helmut (2012): Im System putzen. Marktübersicht Sanierputze. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanie-

ten Materialsystems kann man das WTA-Merkblatt 2-9-04/D Sanierputzsysteme⁵³ zurate ziehen. Soll jedoch das verputzte Mauerwerk wie bei einem Natursteinsockel erhalten bleiben, muss man alternative Möglichkeiten nutzen. Bei Egloffstein (2013)⁵⁴ findet man eine Aufstellung verschiedener Verfahren (siehe Tab. 7).

Der mechanische Austausch ist aufwendig, aber im vorliegenden Fall die einzig sinnvolle Methode. Zuerst müssten die verwitterten Sandsteine komplett herausgenommen oder je nach Zustand teilweise entfernt werden. Die Verwitterung beschränkt sich zumeist auf die unteren zwei bis drei Steinreihen, die unmittelbar im Spritzwasserbereich liegen. Folglich ist nicht der komplette Austausch der Sandsteine nötig. Die oberen Steinreihen wurden bereits durch ein Überhangblech geschützt (siehe Abb. 83), welches den Wasserzutritt von oben an den Sandstein erschwert.

Zusätzlich zu dem Überhangblech ist etwa in der Mitte des Sockelmauerwerks eine Horizontalsperre angebracht, um aufsteigende Feuchtigkeit zu unterbinden. Ausgehend vom optischen Befund ist davon auszugehen, dass diese Horizontalsperre in Form einer Bitumenpappe funktioniert (Abb. 85). Die im Zuge der Instandsetzung herausgenommenen Sandsteine müssten durch neue Steine ersetzt werden, wobei bei einem Teilausbau auch nur ein neuer, kleinerer Sandstein vorgesetzt werden kann. Sollten Steine im Bereich der Horizontalsperre ausgetauscht werden, muss man beim Aus- und Einbau darauf achten, die Horizon-

rung) (2), S. 47–57.

53 Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) (2006): Sanierputzsysteme. Unter Mitarbeit von Sylvia Stürmer. Dt. Fassung vom 24.10.2005, endgültige Fassung: Dez. 2005. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl (WTA-Merkblatt 2-9-04/D).

54 Egloffstein, Petra (2013): Unerwünschte Würze. Flankierende Maßnahmen bei feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanie- rung) (6), S. 28–33.

Verfahren	Vorteile	Nachteile
1 Mechanisches Entfernen (Abbürsten, Absaugen, Abkratzen, Austauschen)	vollständig	Beschädigung der Oberfläche
2 Chemische Salzumwandlung in unlösliche Verbindungen mit Bleihexafluorsilicat oder Bariumhydroxid	Bildung von schwerlöslichen Sulfatverbindungen	teilweise auch leicht lösliche Verbindungen
3 Wasserbad zur Auswaschung der Salze	Effizienz abhängig vom Porenraum, Salzart, Objektgröße, Wassertemperatur und Badwechsel	nur für bewegliche Objekte
4 Kompresse aus Zellulose mit Bentonit, Perlit, Kaolinit	leichtes manuelles oder maschinelles Aufbringen, Fertigprodukte	benötigt mehrere Zyklen, lange Standzeiten
5 Unterdruckverfahren (Absaugung des wassergesättigten Objekts, Entfernung der gelösten Salze)	Entfernung auch großer Mengen Salz	Abdichtungsproblematik für Unterdruck, Effizienz unklar
6 Kulturen mit denitrifizierenden Bakterien: Umwandlung von Nitraten zu gasförmigen Stickstoff, Kationen werden in Carbonate umgewandelt und verbleiben im Objekt	Reduktion von Nitraten	langwierig, zurückbleibende Kationen können Alkalikarbonate bilden
7 Opferputze (Sanierputz): a) Kalkputze b) Kompressenputze	a) effektive Trocknung durch Kapillarität, befundgerecht b) Trocknung durch Kapillarität, höhere Festigkeit (zementär)	geringe Dauerhaftigkeit

Tab. 7 Verfahren zur Mauerwerkssanie rung bei Versalzungsschäden Nach Egloffstein, Petra (2013): Unerwünschte Würze. Flankierende Maßnahmen bei feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanie rung) (6), S. 28–33.

talsperre nicht zu zerstören oder gegebenenfalls zu erneuern. Eine nachträgliche Horizontalabdichtung erreicht man u. U. auch durch Mauerwerksinjektionen.⁵⁵ Dazu müssen allerdings Löcher in die Natursteinsockelwand gebohrt werden.

Um ein einheitliches und sauberes Bild zu erhalten, müssen auch die Fugen vor allem in den verwitterten Bereichen komplett erneuert werden. Nach Trocknung des Fugenmaterials kann der Stein mit einem geeigneten Produkt hydrophobiert werden. Eine Hydrophobierung kommt einer Lackierung gleich, der Stein wird mit einer unsichtbaren Schutzschicht überzogen. Hierfür werden Stoffe wie Paraffin, Siloxan, Silan o. Ä. verwendet, die den Kapillartransport in den Baustoffen unterbinden sollen.⁵⁶ Handelsübliche Produkte sollen die Wasser- und Schadstoffaufnahme reduzieren, den Befall durch Mikroorganismen einschränken und die Frost-Tausalz-Beständigkeit deutlich verbessern. Allerdings muss aus Sicht des Denkmalschutzes der Einsatz zusätzlicher Hydrophierungsschichten kritisch hinterfragt werden, da die Langzeitwirkung nicht immer garantiert ist und ein Eindiffundieren chemischer Substanzen in das Bestandsmaterial nicht ausgeschlossen werden kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass eine Sanierung des Sockelmauerwerks nicht nur aus ästhetischen und denkmalpflegerischen Gründen sinnvoll ist. Zwar hat das Sandsteinmaterial als Verblendmauerwerk hier keine tragende Funktion, der Anschluss an das verputzte Mauerwerk und der Schutz vor Schlagregen und Stauwasser werden jedoch mit fortschreitender Zerstörung nachhaltig beeinträchtigt, wodurch andere Bauteile (Vollziegelmauerwerk und Kellerwand) betroffen sein können.

2.1.3 Feuchteschäden in Wohnräumen

Die Analyse von Feuchteschäden in den Innenräumen offenbart wesentliche Ansatzpunkte für eine energetische Modernisierung. Dabei handelt es sich in der Regel um Schimmelbefall von Innen- und Außenwänden, der in Verbindung mit ungünstiger Möblierung (schlechter Oberflächenbelüftung) und falschem Lüftungsverhalten der Nutzer besonders dramatisch sein kann. Tab. 8 enthält die Hauptquellen von Feuchtigkeit im Haushalt

55 Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit (2006). Dt. Fassung vom März 1996, endgültige Fassung: Aug. 2004. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag (WTA-Merkblatt 4-4-04/D).

56 Egloffstein, Petra (2013): Unerwünschte Würze. Flankierende Maßnahmen bei feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (6), S. 28–33.

durch alltägliche Vorgänge.

Abb. 86 und Abb. 87 zeigen Aufnahmen von Feuchteschäden einer Obergeschosswohnung im Plato-Wild-Ensemble.⁵⁷

Grundsätzlich kann Feuchtigkeit in und an Bauteilen durch Wasseraufnahme in flüssiger oder in dampfförmiger Form erfolgen. Die durchfeuchteten Stellen in der Wohnung, die bereits einen Schimmelbefall aufweisen, sind zum einen auf kondensierende Feuchtigkeit aus fehlerhaftem Nutzerverhalten (wie übermäßige Feuchteproduktion oder unzureichendes Lüften), zum anderen auf die Kondensationsfeuchte, die durch die konstruktiven Wärmebrücken entstanden sind, zurückzuführen. Eindringende Feuchtigkeit von außen kann aufgrund der gut erhaltenen Fassade ausgeschlossen werden.

Schimmelbefall

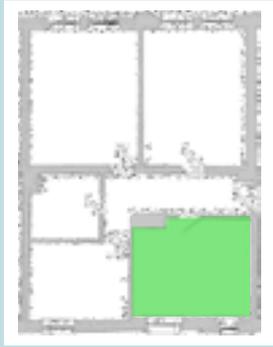
Wesentliche Voraussetzung für Schimmelbefall ist die verfügbare Feuchtigkeit. Bereits bei einer relativen Luftfeuchte von 80% auf der Bauteiloberfläche kann sich Schimmel bilden. Bei einer innenseitigen relativen Luftfeuchte von 50% und einer Temperatur von 20°C ist dieser Wert bei einer Bauteiltemperatur von 12,6°C erreicht. Wenn die Sporenkeimung erst einmal stattgefunden hat, sind bestimmte Schimmelpilze auch noch bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 70% entwicklungsfähig. Regelmäßige Tauwasserbildung fördert somit den Schimmelbewuchs. Aufgrund des für die Schimmelpilzbildung erforderlichen frei verfügbaren Wassers kann die Entstehung von Schimmelpilz immer als Indikator für eine mangelhafte bauliche oder nut-

57 Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

Quelle	Wasserproduktion
Wannenbad	ca. 1,0 Liter/Person
Duschbad	ca. 1,5 Liter/Person
Trocknende Wäsche (4,5 kg geschleudert)	1,0 - 1,5 Liter
Trocknende Wäsche (4,5 kg tropfnass)	2,0 - 3,0 Liter
Kurzgericht (1 Mahlzeit)	0,4 - 0,5 Liter
Langgericht (1 Mahlzeit)	0,5 - 0,8 Liter
Braten (1 Mahlzeit)	ca. 0,6 Liter
Spülmaschine	ca. 0,2 Liter/Spülgang
Waschmaschine	0,2 - 0,3 Liter/Waschgang
Zimmerpflanzen	0,5 - 1,0 Liter/Tag
Aquarium, Zimmerbrunnen	0,9 - 1,2 Liter/(m ² und Tag)
Atmung (1 Person, ruhend)	ca. 0,1 Liter/Stunde

Tab. 8 Typische Wasserproduktion im Haushalt. Nach Bieberstein, Horst (2009): Schimmelpilz in Wohnräumen – was tun? 4. Aufl. Stuttgart: Bieberstein, S. 43.

Küche



a)



a) Innenansicht der nordöstlichen Außenwand der Küche, großflächig mit Schimmel bedeckt im unteren Bereich

b)



b) Detail aus a)
Vermutlich waren hier Schränke oder eine Eckbank aufgestellt, sodass nur eine unzureichende Luftzirkulation vorhanden war

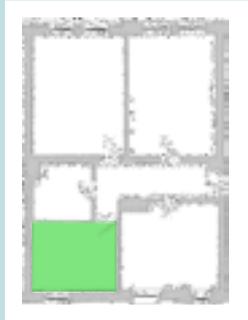
c)



c) Innenwand der Küche zum Treppenhaus, im unteren Bereich mit Schimmel bedeckt, vermutlich ebenfalls durch vorgestellte Möbel hervorgerufen

Abb. 86 Feuchteschäden (Schimmelbefall) in der Küche einer Obergeschosswohnung am früheren Standort einer Sitzgruppe
Quelle: Höflich, Daniel (2013)

Schlafzimmer

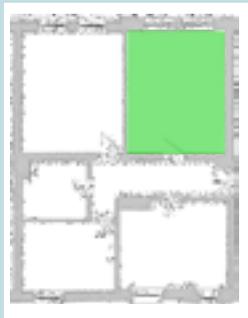


a)



a) Innenseitiger Schimmelbefall an der Schlafzimmereußenwand mit Nordost-Ausrichtung in der Ecke zum Nachbarhaus

Wohnzimmer



b)



c)



d)



e)



b) Innenansicht der südwestlichen Wohnzimmereußenwand mit Schimmelbefall an vielen Stellen

Details:

c) hinter dem Heizkörper

d) in der Fensterlaibung, hinter der Tapete

e) in der Ecke zur Nachbarwohnung

Abb. 87 Feuchteschäden (Schimmelbefall, evtl. *Stachybotrys chartarum*) in Schlaf- und Wohnzimmer einer Obergeschosswohnung. Quelle: Höflich, Daniel (2013)



Abb. 88 Schimmelbefall im Bad: Wachstum auf Fliesenfugen und auf dem Holzfensterrahmen (Fotos: Licha/Wallner/Ziegler)

zungsbedingte Situation angesehen werden.

Der Untergrund stellt ebenfalls einen wichtigen Faktor für das Schimmelpilzwachstum dar: Poröses, kapillar saugendes Material bietet eine gute Feuchtespeichereigenschaft. Darüber hinaus können organische Substanzen wie Tapetenkleister, Farben, Kleber oder Kunststoffe das Schimmelwachstum fördern (siehe Abb. 87 c und d), da diese als reiche Stickstoff- und Kohlenstoffquelle dienen (Lignine, Zellulose, Zucker, Weichmacher).

Im Innenbereich findet man meist Schimmelpilze der Gattungen *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium* und *Stachybotrys*. Letztere gedeiht gut auf zellulosehaltigem Untergrund (Abb. 87), führt zu schwärzlichen Verfärbungen, bildet Mykotoxine und ist als Erreger der Stachybotrymykose (Symptome: Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit) gefürchtet. Die Toxine können durch Atmung und Hautkontakt aufgenommen werden. In Feuchträumen treten auch die Pilzarten *Alternaria tenuis*, *Botrytis cinerea* (verursacht Grauschimmel auf Lebensmitteln) und *Cladosporium herbarum* auf, deren Sporen durch die Außenluft eingefangen werden. Als Schwärzepilze bilden sie Beläge auf Fensterdichtungen oder Fliesenfugen (Abb. 88).⁵⁸

Hankammer und Lorenz (2003)⁵⁹ vergleichen in einer Studie über 104 gerichtlich vorgebrachte Schimmelpilzfälle – rein bauliche mit rein nutzerabhängigen Ursachen für mikrobiellen Befall. Aus diesem Vergleich geht hervor, dass bauliche Ursachen in 50% und bauliche Ursachen in Kombination mit Nutzerverschulden in 35% der Fälle für den Befall verantwortlich sind. 15% der Fälle sind allein nutzerverhaltensbedingt, d. h. Folge unzureichender Lüftung und/oder ungenügender Beheizung.

Schadensbilder

58 Frössel, Frank (2011): Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat. 3., komplett überarb. und erw. Aufl. Stuttgart [auch Baulino-Verl., Leest/Werder (Havel)]: Fraunhofer IRB Verlag, S. 438.

59 Hankammer, Gunter; Lorenz, Wolfgang (2003): Schimmelpilze und Bakterien in Gebäuden. Erkennen und Beurteilen von Symptomen und Ursachen. Köln: Müller, S. 62.

Die im Plato-Wild-Ensemble vorgefundenen Schimmelpilzschäden lassen sich folgendermaßen kategorisieren und möglichen Ursachen zuordnen:⁶⁰

- Fenstersturz: flächige Ausbreitung an der Sturzuntersicht mit zunehmender Intensität im unmittelbaren Anschlussbereich zu den Fensterblendrahmen

Mögliche Ursachen: Wärmebrücke im Blendrahmen-Anschlussbereich, Fenster sitzt nicht in der Wärmedämmebene, sondern in der Luftschicht-Ebene, unzureichend gedämmter Rollladenkasten (in manchen Gebäuden vorhanden)

- Außenwand: flächig, rasenartig befallen

Mögliche Ursachen: geringe Wärmedämmung der Außenwände, überhöhte Luftfeuchtigkeit, unzureichende Lüftung oder Beheizung

- Außenwanddecke: linear-vertikale Ausbildung von Schimmelrasen im senkrechten Außenwandeckbereich mit größter Ausdehnung oberhalb der Fußleiste

Mögliche Ursachen: Tauwasserausfall, ggf. aufgrund von senkrechten geometrischen Wärmebrücken, evtl. unzureichendes Heiz- und Lüftungsverhalten

- Fenster: Schimmelpilzbefall der Glasleiste und auf der Scheibendichtung

Mögliche Ursache: unzureichendes Heiz- und Lüftungsverhalten, Abdeckung der Heizkörper

- Fensterbank: Schimmelpilz im Eck der Fensterbank

Mögliche Ursache: Tauwasserausfall, Wärmebrücke am Fenster (Undichtigkeit)

60 Licha, Maximilian; Wallner, Christian; Ziegler, Thomas (2014): Bestandsmodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Schimmel in Wohnräumen, Raumklima. Master-Projektarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.





Abb. 89 Schimmelwachstum an einer Außenwand (vermutlich *Cladosporium herbarum*) in Verbindung mit unzureichender Belüftung hinter den Unterschränken einer Einbauküche. Chemische Reinigungsmittel können das Problem nicht dauerhaft lösen. (Fotos: Licha/Wallner/Ziegler)

Aus diesem Befund lassen sich folgende Maßnahmen ableiten:

- An den Außenwänden sollte auch in möblierten Räumen ausreichend Luftzirkulation möglich sein (Problem: Einbauküche, Eckbänke, Schrankwände); auf ausreichende Raumbeheizung und Lüftung ist zu achten
- Außenwände und Wände, die ans unbeheizte Treppenhaus angrenzen, sollten einen verbesserten Wärmeschutz bieten, am besten in Verbindung mit einer schimmelpilzhemmenden Oberfläche

Während der erste Punkte das Nutzerverhalten (und damit eine entsprechende Aufklärung der Mieterschaft) adressiert, kann der zweite Punkte durch bauliche Maßnahmen umgesetzt werden.

Aufgrund der gegliederten, erhaltenswerten Fassadenstruktur muss die Wärmedämmung von der Raumseite her erfolgen. Durch bauphysikalische Simulationen (siehe Abschnitt 3) wird eine minimale, bauphysikalisch verträgliche Dämmstärke festgelegt. Als Dämmmaterial sind hierbei kapillaraktive Materialien zu bevorzugen (siehe 1.3.5). Calciumsilikat als kapillaraktives Material weist zudem den Vorteil auf, dass die Oberfläche alkalisch ist (pH 14). Ein pH-Wert im sauren Bereich (pH 4,5 bis 6,5) ist nach Frössel (2009)⁶¹ optimal für das Schimmelpilzwachstum. Der Einfluss des pH-Werts auf die Schimmelbildung wird von Hankammer und Lorenz (2003)⁶² allerdings als untergeordnet angesehen.

61 Frössel, Frank (2011): Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat. 3., komplett überarb. und erw. Aufl. Stuttgart [auch Baulino-Verl., Leest/Werder (Havel)]: Fraunhofer IRB Verlag, S. 439.

62 Hankammer, Gunter; Lorenz, Wolfgang (2003): Schimmelpilze und Bakterien in Gebäuden. Erkennen und Beurteilen von Symptomen und Ursachen. Köln: Müller.

2.1.4 Raumklima-Monitoring

Um den mannigfaltigen Ursachen für Schimmelprobleme auf die Spur zu kommen, wurden im Plato-Wild-Ensemble in einzelnen Wohnungen Raumklimamessungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt.^{63,64}

Die im Bad (Abb. 88) festgestellten Werte liegen etwa bei 55% relativer Feuchte und 19°C Lufttemperatur. Damit erhält man bei ca. 13°C Oberflächentemperatur eine relative Feuchte von 80%, ab welcher mit Schimmelwachstum zu rechnen ist. Oberflächentemperaturmessungen zeigen, dass in den Bereichen der Raumecken auf den Fliesen und am Fenster die Temperatur unter 12°C liegt (gemessen bei winterlichen Außentemperaturen).

Abb. 90 gibt einen 24-h-Ausschnitt aus den Langzeit-Monitoring-Messungen wieder. Diese erstrecken sich jeweils über einen Zeitraum von ca. sechs Wochen bei winterlichen Außentemperaturen.

An jeden Datenlogger waren zwei Messfühler angesteckt, einer im Bereich der Raummitte, der andere näher an der Außenwand. Der Fühler nahe der Außenwand zeigt in allen Räumen eine niedrigere Temperatur und eine höhere relative Luftfeuchtigkeit an.

In der Küche zeigen sich zu den Zeiten 5:30 Uhr, 14:00 Uhr und 18:00 Uhr erhöhte Werte der relativen Luftfeuchte, was zu diesen Tageszeiten auf Kochaktivitäten schließen lässt. Hierbei wird auch eine relative Luftfeuchtigkeit von 100% erreicht.

Nach Aussage der Bewohner wird das Schlafzimmer einmal vormittags ca. 1 Stunde gelüftet, während der Wäschetrockner im Badezimmer läuft, „um die Feuchte aus dem Bad über das Schlafzimmer nach außen zu leiten“ (Aussage des Bewohners). Dies lässt sich anhand des Verlaufs der relativen Luftfeuchte sehr gut erkennen. Vor 9:00 Uhr wurde das Fenster geöffnet, ein Luftaustausch fand statt. Neben der relativen Luftfeuchte sinkt auch die Temperatur ein wenig ab. Gegen 9:30 Uhr steigt die Luftfeuchte aufgrund des Trockners. Dann wird wieder das Fenster geöffnet. Die Temperatur im Schlafzimmer ist im Vergleich zu den zwei anderen Räumen kühler, „da hier die Heizung nicht funktioniert und nur ab und zu mit einem Heizlüfter geheizt wird“.

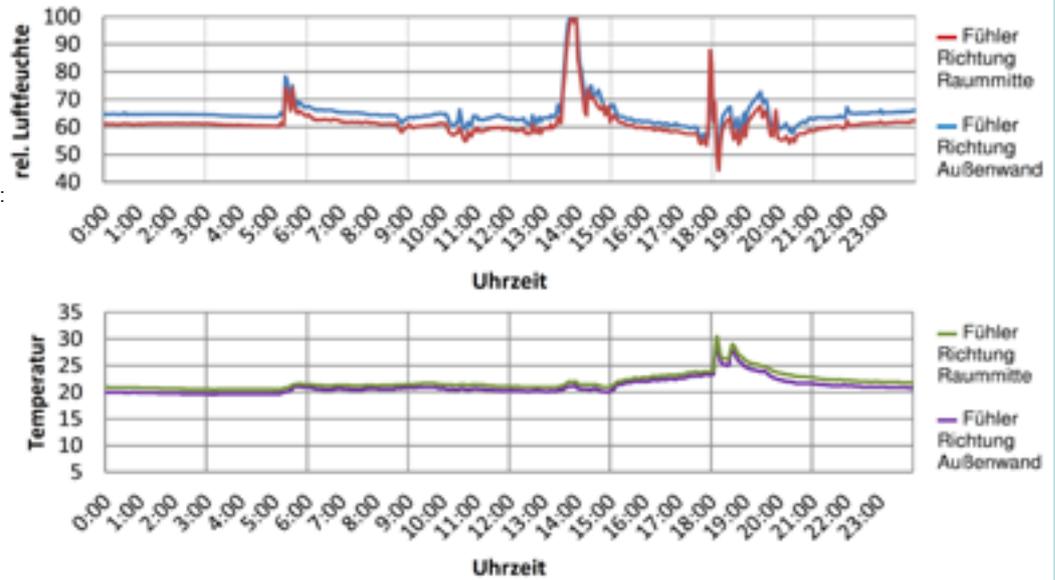
Im Wohnzimmer steigt die relative Luftfeuchte am 24.12.2014 (Heiligabend) wohl aufgrund einer größeren Personenzahl an. Die Temperatur beträgt bis zu

63 Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

64 Licha, Maximilian; Wallner, Christian; Ziegler, Thomas (2014): Bestandsmodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Schimmel in Wohnräumen, Raumklima. Master-Projektarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

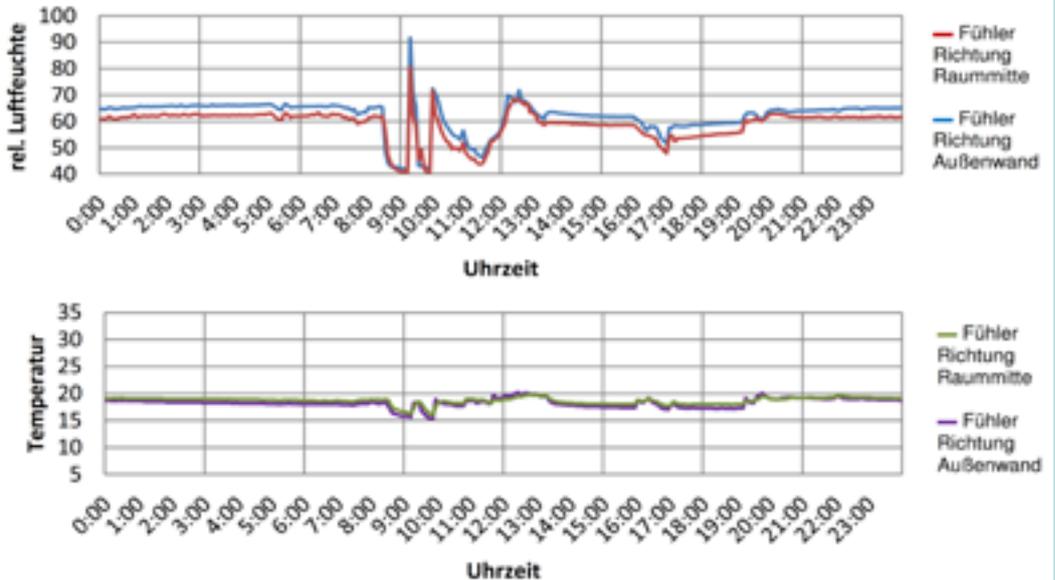
Küche
(12.11.2012)

Außen:
Lufttemperatur:
min. 5,0 °C, max. 9,2 °C
Rel. Luftfeuchte (außen):
min. 84 %, max. 100 %



Schlafzimmer
(22.12.2012)

Außen:
Lufttemperatur:
min. 0,1 °C, max. 1,3 °C
Rel. Luftfeuchte:
min. 98 %, max. 100 %



Wohnzimmer
(24.12.2012)

Außen:
Lufttemperatur:
min. 4,9 °C, max. 10,0 °C
Rel. Luftfeuchte:
min. 80 %, max. 95 %

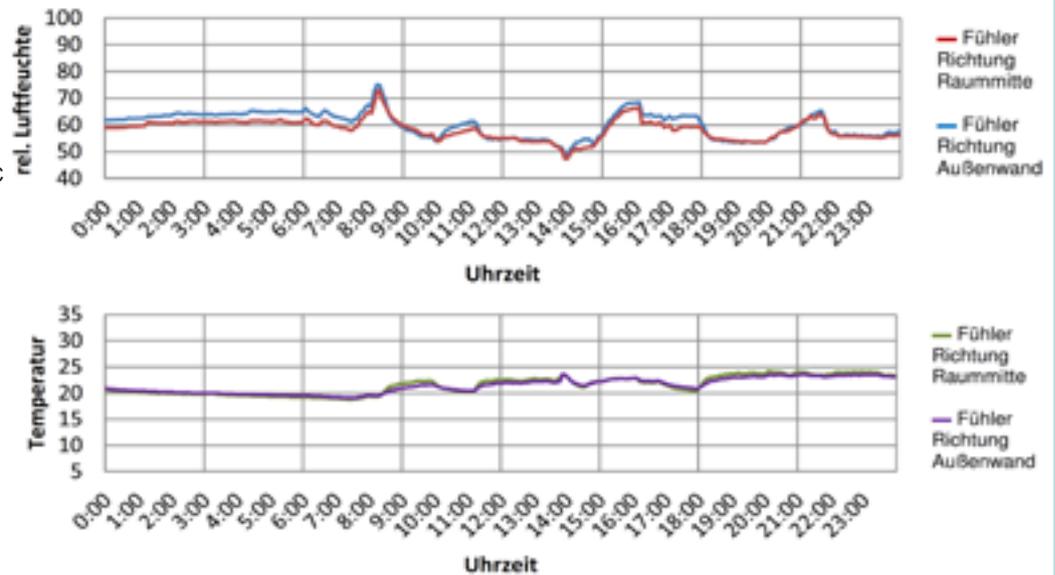


Abb. 90 Auszug aus Langfristmessungen für eine Wohneinheit des Plato-Wild-Ensembles
Quelle: Höflich, Daniel (2013)





Abb. 91 Oben: Feuchteschäden im Keller an der Nordost-Seite des Plato-Wild-Ensembles. Massive Durchfeuchtung hat zu schweren Putzschäden und mehligem innenseitiger Mauerschale vor der Natursteinaußenschale geführt. Unten links: Schäden an Putz und Farbanstrich durch aufsteigende Bodenfeuchte im Keller. Unten rechts: Salzablagerungen und Verkalkung durch aufsteigende Bodenfeuchte auf dem geziegelten Kellerboden. (Fotos: Steffens)

24 °C. Festzuhalten ist, dass je nach Nutzerverhalten der Verlauf der Temperatur sowie der relativen Luftfeuchte über den Tag unterschiedlich ist. Die relative Luftfeuchte ist im Winter mit über 60 % im Mittel zu hoch. An den kalten Außenwänden erreicht man hier langfristig über 80 % relative Luftfeuchte.

2.2 Baustofffeuchtemessungen

Neben raumklimatischen Messungen können auch Baustofffeuchtemessungen Aufschluss über Problemzonen geben.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung einer Wohnung im 1. Obergeschoss war diese schon seit einigen Tagen unbewohnt, unmöbliert und gut durchlüftet. Gemessen wurde jeweils an drei Stellen im Raum in verschiedenen Höhen (5 bis 90 cm über dem Fußboden; siehe Abb. 92).

Die Bestimmung der Baustofffeuchte an der innenseitigen Oberfläche der Außenwände erfolgte mittels einer kapazitiven Oberflächensonde. Dabei wurde die Baustofffeuchte an mehreren Stellen gemessen, nicht nur an den mit Schimmel befallenen Gebieten. Ent-

sprechende Untersuchungen wurden auch im Keller und im Dachgeschoss durchgeführt.⁶⁵

Die kapazitive Materialfeuchtemessung beruht auf einer einfachen und schnellen Methode, mit der zerstörungsfreie Messungen möglich sind. Jedoch ist als Nachteil die begrenzte Genauigkeit zu erwähnen. Faktoren wie Dichteschwankungen, unterschiedliche Bestandteile und die Dicke von Beschichtungen (Putz) beeinflussen das Messergebnis. Die kapazitive Messmethode eignet sich daher besonders für Vergleichsmessungen, um schnell Problembereiche zu identifizieren. Die Materialfeuchtesonde nutzt die hohe Dielektrizitätskonstante von Wasser, um die Feuchtigkeit in Baustoffen zu ermitteln. Dabei wird das zu messende Material durch ein hochfrequentes elektrisches Feld durchdrungen, welches ein Spannungssignal liefert, das proportional zur wirksamen Kapazität des Materials und damit zu dessen Wassergehalt ist. So lässt sich die Feuchte bis zu einer Eindringtiefe von ca. 25 mm erfassen.⁶⁶

65 Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

66 Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (2011): Almemo Handbuch (9. Ausg.). Holzkirchen.

Feuchtemessungen (September 2012)

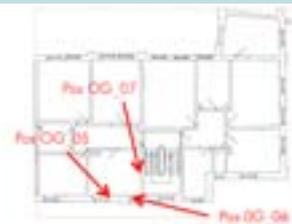
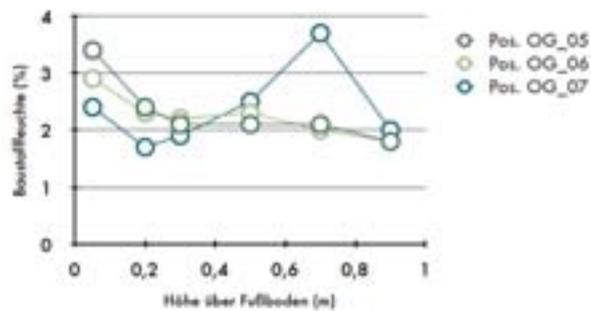
Obergeschoss, Küche (Nord-Ost-Ausrichtung)

Unbewohnt; keine Einrichtung,
bis auf eine kleine Küchenecke; belüftet

Lufttemperatur 22 °C

Oberflächentemperatur 19 - 21 °C

Luftfeuchte 39 - 42 %



Praktischer Feuchtegehalt:
Vollziegel 1... 2,5 vol-%

Feuchtemessungen (September 2012)

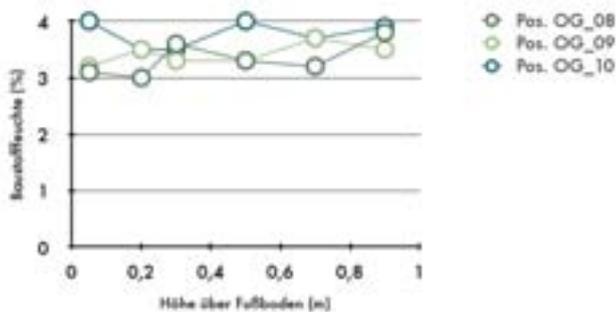
Obergeschoss, Wohnzimmer (Süd-West-Ausrichtung)

Unbewohnt; keine Einrichtung; belüftet

Lufttemperatur 21 - 22 °C

Oberflächentemperatur 20 - 22 °C

Luftfeuchte 39 - 43 %



Praktischer Feuchtegehalt:
Vollziegel 1... 2,5 vol-%

Feuchtemessungen (09/12)

Kellergeschoss

Lufttemperatur 19 °C

Oberflächentemperatur 18 - 19 °C

Luftfeuchte 59 %

Temperatur Boden: 18,5 °C

Baustoffeuchte Boden

Ziegel: 15 %

Fuge: 24%

Praktischer Feuchtegehalt:
Beton ca. 5 vol-%

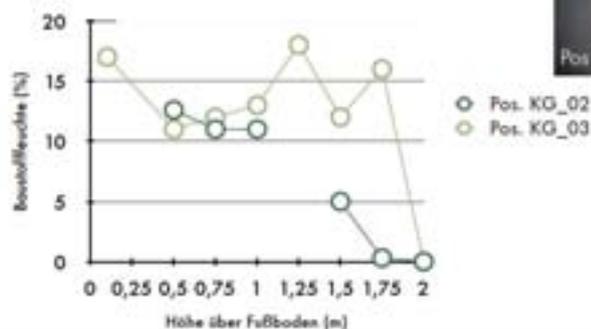


Abb. 92 Baustofffeuchtemessungen in verschiedenen Räumen des Fünfhäuserblocks im Plato-Wild-Ensemble
Quelle: Höflich, Daniel (2013)

Raum	Baustofffeuchte (%)
Küche	1,7 - 3,7
Schlafzimmer	1,2 - 2,6
Wohnzimmer	3,0 - 4,0
Keller	
- Wand	bis 18,0
- Ziegelboden	15,0
- Fugen	24,0
Dach	12,8 - 13,0 (Holz)

Tab. 9 Baustofffeuchtemessung in verschiedenen Räumen eines Gebäudes des Plato-Wild-Ensembles
Quelle: Höflich (2013)

Das Ergebnis der Messungen ist in Tab. 9 zusammengefasst. Die Werte stellen die minimalen und maximalen Messwerte im jeweiligen Raum dar.

Beim Vergleich der Räume im Obergeschoss kann festgehalten werden, dass in den Räumen mit Schimmelbefall (Wohnzimmer und Küche, siehe Abb. 86 und Abb. 87) ein erhöhter Feuchtegehalt analysiert wurde. Als Referenz dient hier der „praktische Feuchtegehalt“, der bei der Untersuchung hinreichend vieler ausgetrockneter Bauten unter ständiger Bewohnung von Menschen in 90% aller Fälle nicht überschritten wird.

Im Keller sind die Luftfeuchte sowie die Baustofffeuchte erwartungsgemäß höher als im Obergeschoss. Aufsteigende Baustofffeuchte ist an der hier untersuchten Stelle nicht feststellbar, vermutlich aufgrund der vorhandenen, noch intakten Horizontalsperre (Abb. 85). In anderen Räumen wurden allerdings abgeplatzter Putz und mehliges Mauerwerk als Folge aufsteigender Bodenfeuchte an der Innenschale der Kellermauern beobachtet sowie mineralische Ablagerungen auf dem Ziegelboden (Abb. 91).

Sanierung

Die aufsteigende Feuchte im Kellermauerwerk (insbesondere in Bereichen, wo die Innenschale nicht in Beton ausgeführt wurde, sondern geziegelt wurde) stellt ein verbreitetes Problem in älteren Bestandsbauten dar. Neben den von Frössel (2011)⁶⁷ und anderen Autoren^{68, 69} beschriebenen Verfahren wie Abdichtung, Sanierputze, hydrophobierende Injektionen oder elektrochemischen Verfahren wurde von Großschmidt et

67 Frössel, Frank (2011): Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat. 3., komplett überarb. und erw. Aufl. Stuttgart [auch Baulino-Verl., Leest/Werder (Havel)]: Fraunhofer IRB Verlag.

68 Engel, Jens (2013): Feuchtigkeitsperrcremes für trockene Häuser. Nachträgliche Horizontalabdichtung. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (SPEZIAL – Sanierung von Feuchtschäden), S. 16–19.

69 Marx, Stefan (2012): Eine Prise zu viel. Mauerwerksabdichtung. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (6), S. 42–44.

al. (2004)^{70, 71} eine Bauteiltemperierung zur Trocknung und energetischen Sanierung vorgeschlagen, auf das im **Kapitel E (Energetische Modernisierung)** noch genauer eingegangen wird.

Die Injektionsverfahren beruhen auf dem Einbringen hydrophobierender Substanzen (abhängig vom Durchfeuchtungsgrad der Baustoffporen mit oder ohne Druck) in die Hohlräume des Baustoffs, d.h. Risse, Hohlräume, Poren, Kapillaren. Klassisch werden hier alkaliarme Kieselsäurepräparate eingesetzt, seit ca. 20 Jahren auch Silicon-Micro-Emulsionen. Die jüngste Entwicklung⁷² von Emulsionen in cremartiger Konsistenz erlaubt das drucklose Einbringen in nahezu horizontal verlaufende Bohrlöcher.

Thermografie

Die Gebäudethermografie hat sich als effektive Methode zur Visualisierung von wärmeschutztechnischen Schwachstellen der Gebäudehülle erwiesen. Sie bildet die Oberflächentemperatur des Objekts ab, die mithilfe dessen thermischer Ausstrahlung (Infrarotstrahlung) errechnet wird. Außenaufnahmen machen schlecht gedämmte Fassadenteile und Wärmebrücken erkennbar, aber auch im Innenraum sind feuchtekritische Oberflächen mit dieser Technik leicht zu identifizieren.

Um eine möglichst gute Unterscheidbarkeit von gut gedämmten und wärmedurchlässigeren Zonen zu erzielen, sollte der Temperaturunterschied zwischen innen und außen mindestens 10 Kelvin betragen. Ferner sollte darauf geachtet werden, dass die Oberflächen nicht durch vorhergehende Sonnenbestrahlung aufgeheizt wurden oder einfallende Sonnenstrahlung vom Objekt reflektiert wird. Daher sind bewölkte Tage, am besten in den Morgenstunden, für die Messung am besten geeignet.

Der Einfluss von starkem Regen und Wind (konvektiver Wärmetransport) auf die Messung ist ebenfalls zu berücksichtigen. Ohne fachliche Vorkenntnisse sind die Thermografien daher nur bedingt korrekt interpretierbar.⁷³ Laut EN 13187 („Wärmetechnisches Verhalten von

70 Großschmidt, Henning (2012): Energetische Gebäudesanierung, Raumbeheizung, Kondensat-/Schimmelschutz und Trockenlegung durch Einsatz von Sockelheizrohren (Temperieranlage). Fallbeispiele und Anwendungshinweise. Online verfügbar unter: <http://www.temperierung.net/temperierung/energetische-gebäudesanierung-raumbeheizung-kondensat-schimmelschutz-und-trockenlegung>, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

71 Kotterer, Michael; Großschmidt, Henning; Boody, F. P.; Kippes, Wolfgang (2004): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung/Climate in Museums and Historical Buildings. Wien: Schloß Schönbrunn Kultur- und Betriebsges.m.b.H. [in Kooperation mit Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg] (Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, 9).

72 Hölzen, Franz-Josef (2012): Gegen die Feuchtigkeit cremen. Nachträgliche Holzabdichtungen mittels Injektionsverfahren. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (3), S. 22–25.

73 Fouad, Nabil A.; Richter, Torsten (2008): Leitfaden Thermografie

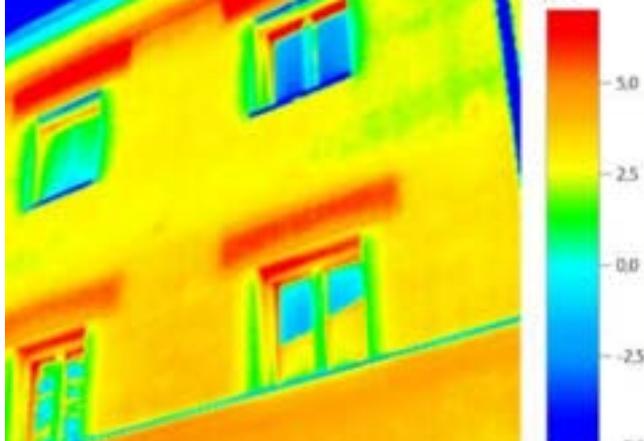


Abb. 93 Thermogramme der Fensterstürze (Plato-Wild-Ensemble). Quelle: Matthias Schmalzbauer (2012)

Gebäuden – Nachweis von Wärmebrücken in Gebäuden – Infrarotverfahren – Thermographischer Bericht“) sollten in einer Dokumentation insbesondere berücksichtigt und aufgeführt werden: Arten der im Bauwerk verwendeten Oberflächenwerkstoffe (Emissionsgrad), Orientierung des Gebäudes bezogen auf die Himmelsrichtungen, Außenlufttemperatur (mindestens mit dem Minimal- und Maximalwert 24 h vor und während der Untersuchung), Angaben zur Sonneneinstrahlung (beobachtet während der 12 h vor Beginn und während der Untersuchung), Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Untersuchung, Innenlufttemperatur und Lufttemperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Umschließungsflächen während der Untersuchungen.

Fassade

Die Fassadenaufnahmen (Abb. 93 und Abb. 94) zeigen im Allgemeinen eine relativ gleichförmige Dämmwirkung der Fassadenteile. Es lassen sich erhöhte Wärmeverluste an folgenden Details erkennen:

- Fensterstürze
- Fassadenteile im Brüstungsbereich von Fenstern, teilweise aufgrund von Heizkörpern in Nischen unter den Fensterbänken
- Fassadenteile im Bereich einbindender Innenwände
- Inhomogenitäten in der Fassade in anderen Bereichen, die allerdings auch auf unterschiedliche Temperierung der Wohnräume zurückgeführt werden können oder auf unterschiedliche Temperaturzonen innerhalb eines Raumes durch starke Luftströmungen

Generell sind diese Befunde typisch für Bestandswände mit sehr hohen Transmissionsverlusten.

Innenräume

Die Aufnahmen von Innenräumen des Plato-Wild-Ensembles erfolgten am 31. Oktober 2012 um ca. 9.30 Uhr.⁷⁴ Auch wenn zu diesem Zeitpunkt der Temperaturunterschied von innen nach außen weniger als 10 Kelvin betrug (ca. 12 °C Außentemperatur), lassen sich die

Wärmebrücken gut erkennen. Die blauen Bereiche in den Thermogrammen repräsentieren im Fall der Innenaufnahmen Flächen mit niedriger Oberflächentemperatur. Hier ist von einem örtlich erhöhten Wärmestrom auszugehen.

In Abb. 95 und Abb. 96 sind sehr gut die starken Temperaturunterschiede der Außen- und Innenwandoberflächen im Anschlussbereich zu erkennen. Der erhöhte Wärmeverlust über die gesamte Außenwand entsteht aufgrund des hohen U-Werts der ungedämmten Vollziegelwand. Entlang der Kante ist der Wärmeverlust durch die geometrische Wärmebrücke noch größer. Abb. 97 zeigt die Wärmeverluste an der Fensterlaibung zwischen Außenwandmauer und Fensterrahmen. Auch am Übergang von Fensterglas zum Rahmen entstehen Wärmeverluste.

Weitere Aufnahmen erfolgten am 05. Dezember 2012 um ca. 9.30 Uhr. Der Temperaturunterschied betrug bei dieser Messung über 10 Kelvin (bei 5 °C Außentemperatur). In Abb. 98 erkennt man gut die abgekühlte Bodenkante an der Außenwand. Durch den darunter liegenden Keller kühlt diese Kante ganz besonders stark ab.

2.3 Bohrkernanalysen



in vorliegendem Fall mit einer durchgehenden wasserführenden Fassade. Neben dem Wärmeverlust durch die Fensterstürze sind auch die Heizkörpernischen als weitere Inhomogenitäten der Fassade erkennbar, die zu unterschiedlichen Oberflächentemperaturen führen (siehe).

Zur Bestimmung der Trockenrohdichte (Verhältnis Trockenmasse zu Volumen in kg/m³) wurden die zwei ca. 20 cm langen Bohrkern (5 cm Durchmesser) der

im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung, 3., unveränd. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

74. Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrother-

75. Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrother-



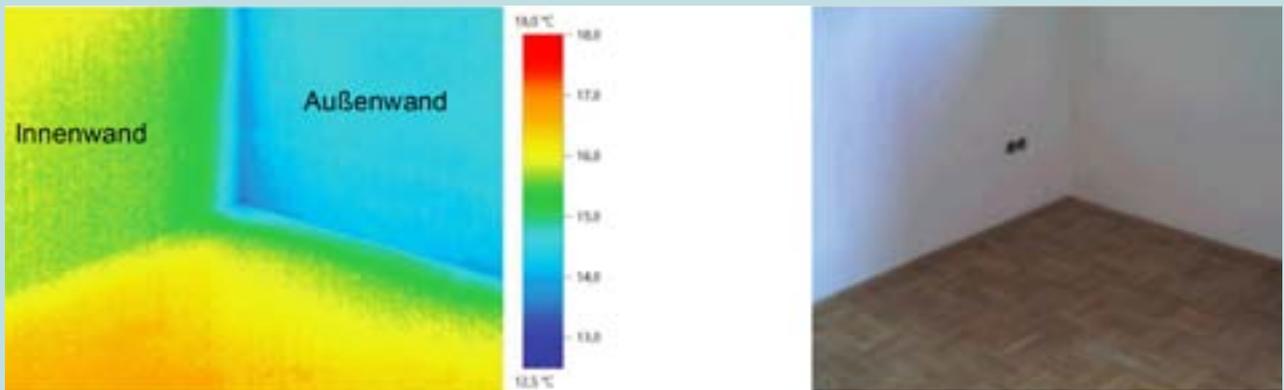


Abb. 95 Thermografie- und Echtbild Raumecke, Obergeschoss, Ausrichtung Norden

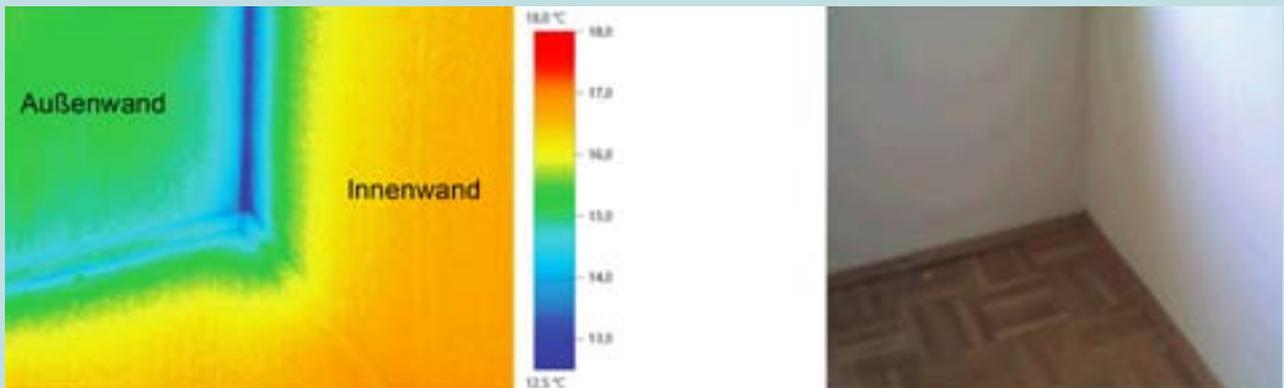


Abb. 96 Thermografie- und Echtbild Raumecke, Obergeschoss, Ausrichtung Osten

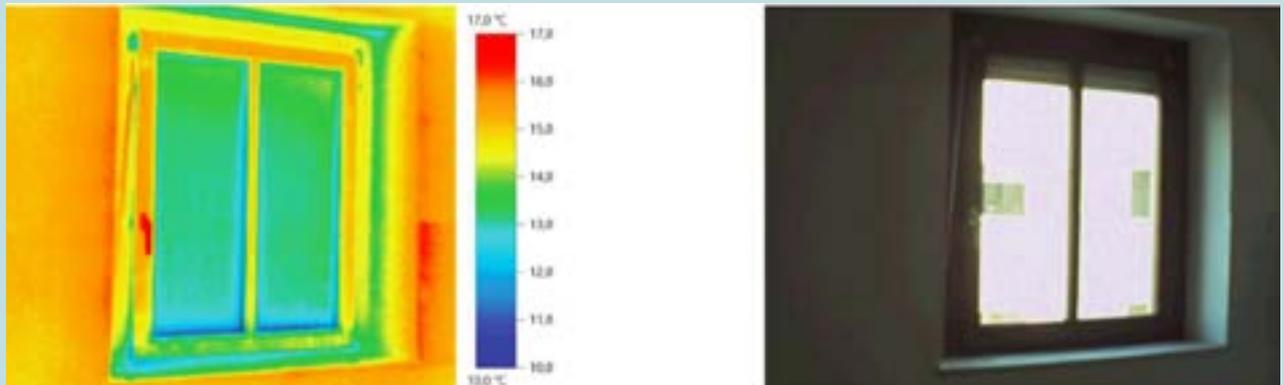


Abb. 97 Thermografie- und Echtbild Fenster, Obergeschoss, Ausrichtung Nordost

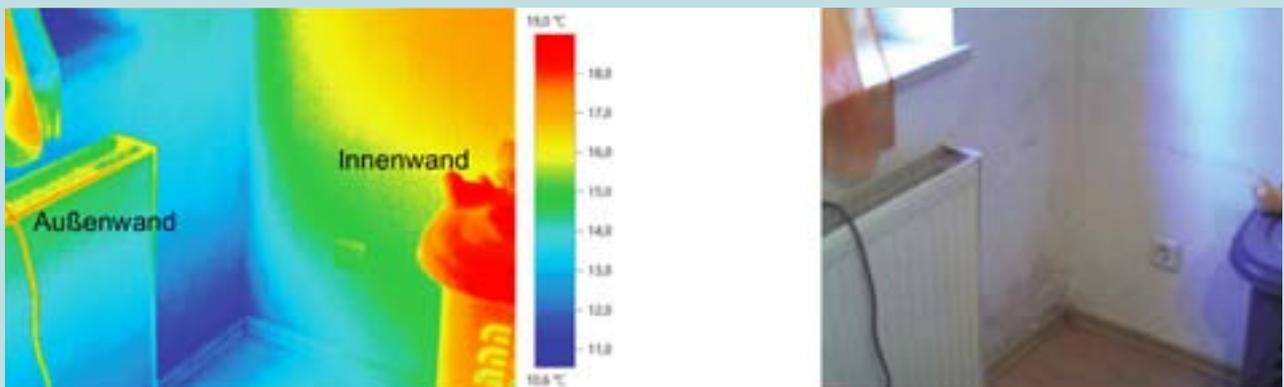


Abb. 98 Thermografie- und Echtbild Raumecke, Schlafzimmer im Erdgeschoss, Ausrichtung Nordost
Quelle: Höflich, Daniel (2013)

Ziegelwand und der Betonwand auseinandergesägt, um zwei gleich große Proben desselben Materials zu erhalten. Danach wurden die vier Proben bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurden die Probekörper gewogen und vermessen, um das Volumen zu bestimmen. Neben der Trockenrohddichte kann zudem das Größtkorn D_{max} des Betons festgestellt werden. Es beträgt im vorliegenden Betonbohrkern 32 mm.

Beispiel: Bohrkernentnahme im Haus Walderdorffstr. 2 (Daniel Höflich, 2013)⁷⁶

a) 1. OG, Küche, Außenwand zur Walderdorffstraße

Bohrkerndurchmesser: 2,5 cm und 5 cm

Wandaufbau: Vollziegel (40 cm – 55 cm)
Innenputz ca. 1,5 cm
Fugen aus sehr sandigem Mörtel,
Breite ca. 2,5 cm

b) Kellergeschoss, Außenwand zur Walderdorffstraße

Bohrkerndurchmesser: 2,5 cm und 5 cm

Wandaufbau: Beton (ca. 35 cm) und
Natursteinmauerwerk (ca. 20 cm)

Ergebnisse für die Trockenrohddichte ρ :

	Vollziegel		Beton	
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
[kg/m ³]	1818	1827	2130	2179

Ergebnisse für den Wasseraufnahmekoeffizienten w :

	Vollziegel		Beton	
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
[kg/m ² h ^{0,5}]	15,7	16,4	3,0	3,8

Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Der Wasseraufnahmekoeffizient w wurde in Anlehnung an DIN 1015-18 „Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel)“ ermittelt. Dazu wurden die trockenen Probekörper (Bohrkerne) mit einer Folie umwickelt und nochmals ihre Trockenrohddichte (mit Folie) bestimmt. Danach wurden sie in 30-Sekunden-Abständen in ein 0,5 cm tiefes Wasserbad gestellt. Zu den Ableszeitpunkten (5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 Minuten) wurden die Bohrkerne entnommen, abgetupft, gewogen und sofort wieder in das Wasser zurückgesetzt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient w in kg/(m²·h^{0,5}) gibt an, welche Menge Wasser m_w (in kg/m²) von 1 m² Saugfläche nach einer Wirkungszeit von t (Stunden) aufgesogen werden:⁷⁷

$$m_w(t) = w \sqrt{t}$$

⁷⁶ Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

⁷⁷ Fischer, Heinz-Martin; Freymuth, Hanns; Häupl, Peter; Homann, Martin; Jenisch, Richard; Richter, Ekkehard; Stohrer, Martin (2008): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 6., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.



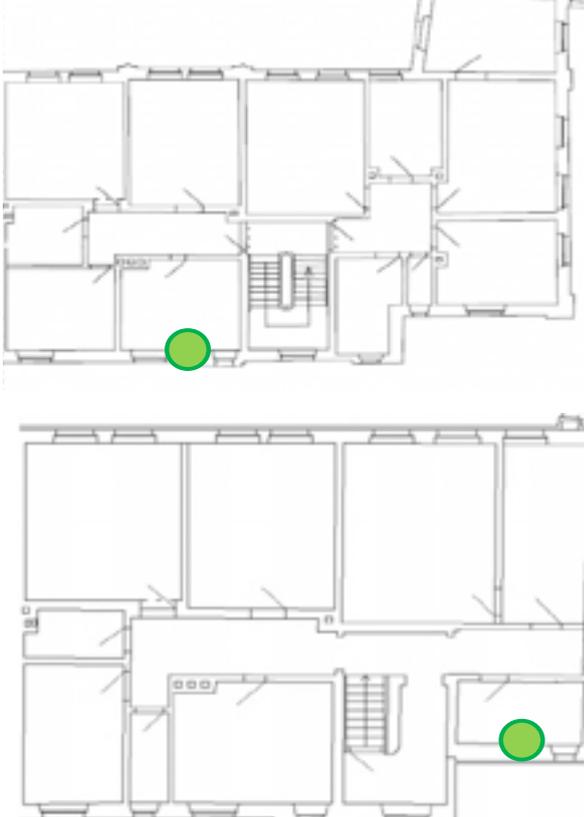


Abb. 99 Grundriss Obergeschoss (oben) und Kellergeschoss (unten) sowie entsprechende Fotos der Kernbohrungen (Grundrisse: Annika Zeitler; Fotos: Daniel Höflich)

Der Zahlenwert von w entspricht der Wassermenge, die zwischen einer Wirkungszeit von 10 und 120 Minuten aufgesogen wird.

Die ermittelte Trockenrohdichte des Vollziegels und Betons liegt im typischen Bereich (siehe DIN 4108-4 und Tab. 10). Dennoch gibt es Unterschiede zwischen der Trockenrohdichte und der realen Dichte in feuchter Umgebung. Aufgrund der Feuchte des Baustoffs in der Konstruktion ist die Dichte dort höher. Beide untersuchten Baustoffe sind wassersaugend. Der Vollziegel saugt kapillar allerdings fast das Fünffache an Wasser im Vergleich zum Beton. Bei der Feuchtezunahme von 1 Masse-% bei Ziegelsteinen ($1\,200$ bis $2\,000\text{ kg/m}^3$) erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit um 15 bis 20%. Ein trockener Baustoff besitzt im Vergleich zu einem feuchten Baustoff eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Die in den Poren eingeschlossenen Stoffe (Luft, Wasserdampf oder Wasser) beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit. Luft

hat eine geringere Leitfähigkeit als Wasser.⁷⁸ Eine höhere Wasseraufnahme bedeutet damit auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

2.4 Parameter für den Wärmeschutz

In der Literatur finden sich zahlreiche Aufstellungen über typologische, das heißt der Bauzeit und Konstruktionsklasse (kurz: Baualterklasse) typischerweise zukommende, Bauteilparameter. In der Regel beschränken sich die Zahlenwerke auf die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte, vgl. auf Seite 81), was für eine Wärmeschutzbeurteilung und Energiebedarfsabschätzung ausreicht (siehe Tab. 11).

⁷⁸ Arndt, H. (2002): Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis. 2. Aufl. Berlin: Verlag Bauwesen.

Baustoff	Rohdichte ρ in kg/m^3	Wasseraufnahmekoeffizient w in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$	Eigenschaft
		< 0,001	wasserdicht
Kunststoffdispersion		0,05 - 0,2	wasserabweisend (< 0,5)
Bimsbeton	600	1,5 - 2,5	wasserhemmend (0,5 bis 2,0)
Zementputz	2100	2 - 3	wassersaugend (> 2,0)
Kalkzementputz	1800	2 - 4	
Polystyrol (XPS/EPS)		3	(bis 0,5 vol-%)
Kalksandstein	1800	4 - 8	
Porenbeton	400	4 - 8	
Weißkalkputz	1200	7	
Vollziegel	1800	20 - 30	
Gipsbauplatten	900	35 - 70	

Tab. 10 Trockenrohdichten und Wasseraufnahmekoeffizienten einiger Baustoffe nach Fischer et al. (2008), S. 369, bzw. Christoph; Frank, Thomas (2004): Bauphysik. 2., durchges. und aktualisierte Aufl. Zürich: Vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH (Bd. 2), S. 61.



Abb. 100 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Bohrkerne (Fotos: Höflich)

Feuchteschutzbewertungen erfordern zudem genauere Angaben über den Diffusionswiderstand der Baustoffe und deren Eigenschaften hinsichtlich des kapillaren Wassertransports. Diese Parameter lassen sich für gängige Baustoffe näherungsweise aus marktüblichen Simulationsprogrammen (z.B. WUFI⁷⁹) bzw. Tabellenwerken⁸⁰ entnehmen.

2.4.1 Typologische U-Werte

Die meisten Bauteilparameter werden in der Praxis durch Typologisierung der Bausubstanz abgeschätzt.

⁷⁹ Künzel, Hartwig (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart.

⁸⁰ Schneider, Klaus-Jürgen; Goris, Alfons; Albert, Andrej (2012): Baub Tabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 20. Aufl. Köln: Werner Verlag.

In der Literatur, z.B. bei Maier (2011)⁸¹ oder Böhmer und Güsewelle (2005)⁸², gibt es zahlreiche Angaben zu den Durchlasswiderständen bzw. U-Werten historischer Konstruktionen, die daher im Einzelfall nicht alle empirisch ermittelt werden müssen.

Tab. 11 zeigt eine Aufstellung typischer Konstruktionen für Massivbauten verschiedener Baualtersklassen. Haas-Arndt und Ranft (2011)⁸³ teilen den Gebäudebestand in Deutschland in sieben Baualtersklassen ein:

- Gebäude vor 1900, z. B. Fachwerkhäuser;
- Gebäude zwischen 1900 und 1918 (Gründerzeithäuser)
- Zwischenkriegszeit (1919 bis 1945)
- Nachkriegszeit (1945 bis 1959)
- Sechziger Jahre (1960 bis 1969)
- Gebäude mit ersten Bestrebungen zur Energieeinsparung (1970 bis 1976)
- Gebäude nach Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung (1977 bis 1984)

Nach der Bayerischen Bauordnung (BayBO) von 1901⁸⁴ müssen Umfassungen aus Backsteinmauerwerk bei „2-stöckigen Wohngebäuden“ (bis 2. Obergeschoss) mindestens folgende Stärken aufweisen:

- im 2. und 1. Stockwerk je 0,38 m (1½ Stein);
- im Erdgeschoss je 0,51 m (2 Stein).

In Abgleich mit Angaben über bauzeitlich typische Konstruktionen und den in Kapitel A erarbeiteten Informationen der Bauaufnahme kommt man für den unsanierten Zustand zu einem Parametersatz, der beispielhaft in Tab. 12 dargestellt ist.

Die Tabelle enthält bereits Dimensionierungen für die

⁸¹ Maier, Josef (2011): Energetische Sanierung von Altbauten. 2., ergänzte Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

⁸² Böhmer, Heike; Güsewelle, Frank (2005): U-Werte alter Bauteile. Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

⁸³ Haas-Arndt, Doris; Ranft, Fred (2011): Altbauten sanieren – Energie sparen. BINE-Fachbuch. 3., aktual. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

⁸⁴ Luitpold, Prinzregent von Bayern (1901): Bayerische Bauordnung. BayBO. Online verfügbar unter: <http://www.stadtgrenze.de/s/bbo/baybo1901/15.htm>, zuletzt geprüft am 10.10.2014.

Typologische U-Werte für Bestandsgebäude verschiedener Baualtersklassen (nach Haas-Arndt und Ranft)

	Bauteil	Beschreibung	U-Wert [W/m ² K]	Besonderheiten/ Schwachstellen	Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]
Von 1900 (Fachwerk)	Außenwand	Sichtfachwerk, Außenwände 12–16 cm aus Eiche und Leichtlehm	2,1–2,2	dünne, ungedämmte Außenwände, Undichtigkeiten gegen Wind und Schlagregen; Innendämmung bedingt möglich	230 bis 425
	Kellerdecke	Kappendecke, Dielenboden, gestampfter Lehm zum Erdreich	2,3		
	Oberste Geschossdecke	Holzbalkendecke mit Lehmschlag, Dielenboden, unterseitiger Putz auf Schilfrohrmatte	1,5		
	Dachschräge	Schalung Putz auf Putzträger	1,8–2,9		
	Fenster	Holzfenster mit Sprossen, einfach verglast	5,2		
1900 - 1918	Außenwand	beidseitig verputztes Vollziegelmauerwerk, 24 - 74 cm	0,9–1,5	Stuckornamentik der Fassaden, Innendämmung bedingt möglich	
	Kellerdecke	Holzbalkendecke mit Lehmschlag, Hohlsteindecke oder gemauertes Ziegelgewölbe	1,2		
	Oberste Geschossdecke	Holzbalkendecke mit Lehmschlag	1,0–1,5		
	Dachschräge	Sparschalung mit Putz auf Schilfrohrträger	2,9		
	Fenster	Holzfenster, einfach verglast Kastenfenster	5,0 2,5–2,6		
1919 - 1945	Außenwand	Vollziegelmauerwerk, 24 cm, beidseitig verputzt	1,1–2,0		200 bis 350
	Kellerdecke	zweischaliges Mauerwerk, je 11,5 cm, mit 6–7 cm Luftschicht	1,5		
	Oberste Geschossdecke	Kappendecke (Beton oder gemauert), Terrazzobelag	1,2		
	Dachschräge	Holzbalkendecke, oberseitig Dielenboden, unterseitig Putz	1,4–1,5		
	Fenster	Sparschalung mit Putz auf Schilfrohrträger Holzfenster, einfach verglast Kastenfenster	2,9 5,2 2,5–2,6		
1919 - 1945	Außenwand	Vollziegelmauerwerk, 24 cm, beidseitig verputzt; Hohlblockstein (meist aus Bimsstein), beidseitig verputzt, 24–30 cm	1,5 1,3	Massenwohnungsbau; Materialmängel, schlichte, schmucklose Bauweise, kaum Wärmedämmung	200 bis 375
	Kellerdecke	zweischaliges Mauerwerk, je 11,5 cm, mit 6–7 cm Luftschicht			
	Oberste Geschossdecke	Ortbeton, oberseitig mit Dielung oder Estrich	2,0		
	Dachschräge	Betondecke mit unterseitigem Putz	3,0		
	Fenster	2–5 cm verputzte Holzwolleleichtbauplatten Holzfenster, einfach verglast; Kastenfenster	1,5–1,8 5,2 2,6		
1960 - 1969	Außenwand	Hohlblockstein, beidseitig verputzt, 24–30 cm	1,4–1,5	geringer konstruktiver Wärmeschutz; Heizkörpernischen in der Außenwand	150 bis 320
	Kellerdecke	zweischaliges Mauerwerk, 24 cm mit Vormauerschale 11,5 cm und 3 cm Luftschicht	1,2		
	Oberste Geschossdecke	Ortbeton, oberseitig mit Dielung oder Estrich	1,2–2,0		
	Dachschräge	Betondecke mit Verbundestrich auf geringer Mineralfaserdämmung; Holzbalkendecke mit Schüttung, unterseitig geputzt	1,0		
	Fenster	2–5 cm verputzte Holzwolleleichtbauplatten; Warmdach mit geringer Dämmung ein- bis zweifach verglaste Holzfenster; Verbund- oder Kastenfenster	1,2–5,2 0,9 2,8–5,2 2,6–2,8		
1970 - 1976	Außenwand	Hohlblocksteine, 17,5–24 cm mit 6 cm Luftschicht und Vormauerschale	1,2–1,3	geringer konstruktiver Wärmeschutz; Heizkörpernischen in der Außenwand	150 bis 200
	Kellerdecke	Hohlblocksteine, 17,5–24 cm mit 3–4 cm Dämmung und Vorhangfassade	0,8		
	Oberste Geschossdecke	Beton, 16 cm, 4 cm Dämmung und Vorhangfassade	0,8		
	Dachschräge	Betondecke mit bis zu 4 cm Dämmung, schwimmender Estrich	0,8		
	Fenster	Kehlbalkenlage mit bis zu 8 cm Dämmung und unterseitigem Gipskarton Betondecke mit Verbundestrich auf geringer Mineralfaserdämmung	0,4 1,0		
1977 - 1984	Außenwand	6–8 cm Mineralfaserplatten, Gipskartonplatten oder Holzvertäfelungen	0,6		
	Kellerdecke	Isolierverglasung	2,8		
	Oberste Geschossdecke	mehrschichtige Wandaufbauten	0,8–1,3		
	Dachschräge	Betondecke mit bis zu 4 cm Dämmung, schwimmender Estrich	0,8		
		Betondecke mit schwimmendem Estrich auf 2–4 cm Dämmung	0,5–0,6		
		8 cm Mineralfaserplatten, Gipskartonverkleidung	0,5–0,6		

Tab. 11 Typische U-Werte von Konstruktionen aus verschiedenen Baualtersklassen nach Haas-Arndt und Ranft (2011): Altbauten sanieren – Energie sparen. BINE-Fachbuch. 3., aktual. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

nachträgliche Wärmedämmung (hier Calciumsilikat-Innendämmplatten und Styrodur-Dämmplatten auf der obersten Geschossdecke, vgl. Abb. 101), die im Laufe des Projekts definiert wurden. Die Wahl der Dämmstoffdicke war zunächst eine überschlägige Schätzung zur Verbesserung der U-Werte und wurde mithilfe der bauphysikalischen Berechnungen im Nachhinein festgelegt.

Die dabei erreichten U-Werte entsprechen im Wesentlichen den in der Literatur vorgeschlagenen Zielwerten bei Maier (2011).⁸⁵

2.4.2 U-Wert-Messungen

In bestimmten Situationen kann es hilfreich sein, durch exemplarische Messungen die Durchlass

⁸⁵ Maier, Josef (2011): Energetische Sanierung von Altbauten. 2., ergänzte Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Bauteil	Material	Rohdichte [kg/m ³]	λ [W/mK]	Stärke [m]	U-Wert [W/m ² K]
Ist-Zustand					
Außenwände EG	Kalkzementputz	1800	1	0,015	Dicke Vollziegel abh. von Geschoss
	Vollziegel	1800	0,81	0,51	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
Außenwände 1. OG	Kalkzementputz	1800	1	0,015	Dicke Vollziegel abh. von Geschoss
	Vollziegel	1800	0,81	0,38	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
Außenwände 2. OG	Kalkzementputz	1800	1	0,015	Dicke Vollziegel abh. von Geschoss
	Vollziegel	1800	0,81	0,38	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
Außenwände Keller	Kalksandstein	1600	0,79	0,2	Kalksandstein nur bis OK Gelände außen im Sichtbereich
	Beton	2200	1,65	0,35	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
Wände zum Treppenhaus	Kalkzementputz	1800	1	0,015	Konzept: unbeheiztes Treppenhaus
	Vollziegel	1800	0,81	0,25	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
DG-Wohnung: Wand zum unbeheizten Dachraum	Kalkzementputz	1800	1	0,015	Dicke Vollziegel abh. von Geschoss
	Vollziegel	1800	0,81	0,25	
	Kalkzementputz	1800	1	0,015	
Kellerdecke	Dielen	500	0,13	0,03	1,13
	Lagerholz	500	0,13	0,07 x 0,10	
	Sand	1800	0,7	0,1	
	Beton	2200	1,65	0,035	
	Vollziegel	1800	0,81	0,12	
	Zementgebundene Spanplatte	500	0,13	0,02	
Geschossdecke (zwischen OG)	Lattung	-	-	0,027 x 0,05	0,46
	Balken	500	0,13	0,20 x 0,14	
	Lattung	500	0,13	0,018	
	Schilfmatte	170	0,047	0,005	
	Putz	1800	1	0,02	
	Spanplatten	500	0,13	0,02	
Oberste Geschossdecke	Styrodur-Dämmplatten	-	0,04	0,09	0,35
	Holzdielen	-	-	0,25	
	Schüttung (im Hohlraum)	-	-	-	
	Holzbretter (Fehlboden)	500	0,13	0,018	
	Schilfmatte	170	0,047	0,005	
	Putz	1800	1	0,02	
Innentrennwände	Vollziegel	1800	0,81	0,12	2,45
Wohnungstür	Holz				2,00
Fenster	Holzfenster (Fichte), Isolierverglasung (1980er Jahre)				(typologischer Schätzwert) 2,50
Haustür	Alu, Glas			1,8 W/m ² K	1,80
Sanierter Zustand					
Außenwand (zusätzliche Schichten)	Calcium-Silikat-Innendämmung	270	0,055	0,08	Außenwände (incl. CaSiO ₃ -Dämmung)
	Innenputz (neu) / Gipsputz ohne Zuschlag	1200	0,35	0,01	
Oberste Geschossdecke	zusätzliche Styrodur-Dämmung über OG-Decke		0,04	0,05	0,24
Fenster	Neue Fenster, 3-fach Verglasung				0,80

Tab. 12 Bauteil-Parameter für das Plato-Wild-Ensemble.

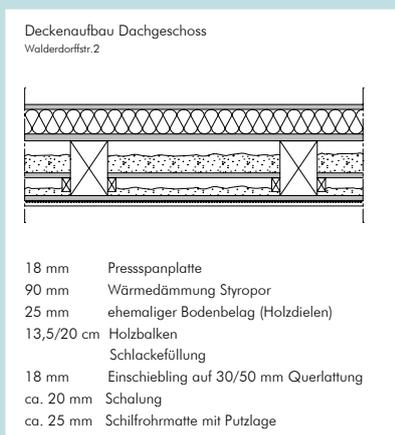


Abb. 101 Aufbau der obersten Geschossdecke im Gebäude Walderdorffstr. 2 des Plato-Wild-Ensembles. Die bereits vorhandene Dämmung auf den Holzdielen führt bereits zu einem guten Dämmstandard mit U-Wert 0,35 W/(m²K), der durch eine zusätzliche Dämmschicht von ca. 5 cm Styrodur auf einen Zielwert von ca. 0,24 W/(m²K) gebracht werden kann.

widerstände von Bauteilen bzw. den entsprechenden U-Wert empirisch zu ermitteln.

Zur Klassifikation der in den Gebäuden vermutlich Mitte der 1980er-Jahre erneuerten Fenster wurden stichprobenartig U-Wert-Messungen an den Verglasungen durchgeführt. Aufgrund der komplexen Einflüsse von Randverbund und Fensterrahmen wurden vor Ort nur die U_g -Werte der Verglasung ermittelt. Dazu werden die Oberflächentemperaturen am Glas mithilfe von Thermoelement-Sensoren gemessen und die durch das Glas fließende Wärmestromdichte mithilfe einer Wärmeflussplatte. Aus der Beziehung $q = \Delta\Theta/R$ kann der Durchlasswiderstand R des Glases berechnet werden. In Verbindung mit den Rechenwerten für die Wärmeübergangswiderstände folgt daraus der Durchgangskoeffizient oder U-Wert.

Im Allgemeinen ist die Messung des U-Werts von Fensterbauteilen im Prüfstand mit dem Plattengerät nach DIN EN 674 (Verglasung; „Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten“) oder anhand des Heizkastenverfahrens („Hot Box“) nach DIN EN 12412-2 („Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens - Teil 2: Rahmen) und DIN EN ISO 12567-1 („Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern und Türen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens – Teil 1: Komplette Fenster und Türen“) geregelt.

Der Gesamt-U-Wert eines Fensters U_w errechnet sich aus dem U-Wert der Verglasung (U_g) und des Rahmes (U_f) sowie dem längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten ψ_g für den Glas-Randverbund:⁸⁶

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + L_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

Dabei bezeichnen A_g , A_f und L_g den Flächeninhalt des Glases bzw. des Randes und die Länge des Randverbunds. Für neue Holzfensterrahmen kann man mit einem U-Wert von $U_f = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ rechnen. Die EnEV 2014 nennt als Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von gegen Außenluft angrenzenden Fenstern, Fenstertüren, Dachflächenfenstern und Glasdächern in Wohngebäuden $U_{w,\text{max}} = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.⁸⁷ Um dies zu er-

86 DIN EN ISO 10077-1:2010 („Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten“).

87 EnEV 2014, Anlage 3 (zu den § 8 und § 9) („Anforderungen bei Änderung von Außenbauteilen und bei Errichtung kleiner Gebäude; Randbedingungen und Maßgaben für die Bewertung bestehender

reichen, müssen zumindest Fenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung eingesetzt werden (vgl. hierzu Gebäudetypologien des Instituts für Wohnen und Umwelt, Loga et al. 2011).⁸⁸

Die Erneuerung der Fenster, die im vorliegenden Fall aus den 1980er-Jahren stammen, mit Wärmeschutzverglasung erfolgt in enger Abstimmung mit dem Konservierungskonzept (Kapitel B). Aufgrund der historischen Bausubstanz sind hier Holzfenster zu wählen, deren Beständigkeit und Lebenszykluskosten durchaus mit Kunststofffenstern verglichen werden können.⁸⁹ Bei einer Dreifachverglasung lässt sich ein U-Wert von $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ realisieren.

2.5 Schallschutzmessungen

Mit gestiegenen Komfortansprüchen sind auch die Erwartungen an die akustische Qualität der Bausubstanz gestiegen. Die in den Normenwerken DIN 4109 und VDI 4100 festgelegten Mindestanforderungen für Luftschalldämmung (Fassade und Trennbauteile zwischen Wohnungen) bzw. Norm-Trittschallpegel (Tab. 13) werden in Altbauten häufig nicht eingehalten.

Zeitgemäßer Schallschutz orientiert sich an dem Stand der Technik und allgemein akzeptierten Komfortansprüchen. Diesen werden die vergleichsweise niedrigen Anforderungen der DIN 4109 als öffentlich-rechtliches Instrument der bauaufsichtlichen Nachweisführung nicht mehr gerecht. Höhere Anforderungen wie die Schallschutzstufen II und III nach VDI 4100 spiegeln einen zeitgemäßen Schallschutz eher wider.

Die Luftschallübertragung zwischen den Wohnbereichen erfolgt über die Wände und Decken, durch offene Spalte, Rohrleitungen und undichte Türfugen. Während die Luftschallübertragung über Wände aus Massiv-Mauerwerk meist ausreichend verhindert wird – hier sind bewertete Schalldämmmaße von 60 dB keine Seltenheit –, kann die Übertragung durch leichte Bauteile wie Fenster und Türen zum Problem werden. Abb. 104 zeigt einige Ergebnisse für das Schalldämmmaß zwischen Erdgeschoss und 1. Obergeschoss bzw.

Wohngebäude“).

88 Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden (EU-Projekt „Typology Approach for Building Stock Energy Assessment“). Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt.

89 Fischer, Konrad (1991): Holzfenster. Sechzehn Argumente für die erhaltende Instandsetzung. Hg. v. Deutscher Burgenvereinigung e.V. Braubach (Praxis Ratgeber zur Denkmalpflege, 1).

zwischen benachbarten Erdgeschosswohnungen. Die Anforderung an das bewertete Luftschalldämmmaß R'_{w} von 54 dB (Wohnungstrenndecke) bzw. 53 dB (Trennwand) wird mit dem vorhandenen Schalldämmmaß durchaus erreicht. Allerdings beobachtet man bei hohen Frequenzen eine reduzierte Schalldämmung, die typisch ist für Leckagen zwischen den Wohnungen in Form von Türfugen, die den Schall über das Treppenhaus hinweg übertragen.

Zum direkt an festen Bauteilen angeregten Körperschall zählt vor allem der Trittschall. Gerade in Altbauten mit schlecht gedämmten, relativ leicht gebauten Holzbalkendecken ist diese Form der Schallübertragung zwischen den Wohnungen besonders kritisch.⁹⁰

Für den vorhandenen Normtrittschallpegel $L'_{n,w}$, der als Maß für die Übertragung des Körperschalls (in Form von Trittschall) durch die Decke dient, finden sich durchwegs zu hohe Werte, deutlich über 60 dB (Abb. 104). Sie liegen im Bereich des von Giebler et al. (2008)⁹¹ mit 65 dB angegebenen typischen Werts für Holzbalkendecken ohne ausreichende Unterdeckenkonstruktion (abgehängte Decke) bzw. schwimmenden Estrich.

Durch das Aufbringen eines schwimmenden Estrichs kann man in etwa 10 dB Verbesserung erwarten, da-

90 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva (2003): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Aufl. mit CD-ROM. Berlin: Huss-Medien, Verl. für Bauwesen.

91 Giebler, Georg; Fisch, Rainer; Krause, Harald; Musso, Florian; Petzinka, Karl-Heinz; Rudolphi, Alexander (2008): Atlas Sanierung. Instandhaltung, Umbau, Ergänzung. 1. Aufl. Basel: Birkhäuser.

mit ist aber das Ziel von 53 dB nicht ohne Weiteres zu erreichen. Daher sollte zur nachhaltigen Verbesserung eine abgehängte Unterdecke in den Aufbau integriert werden. Untersuchungen zu konstruktiven Verbesserungen wurden bereits von Gösele et al. (1989)⁹² unternommen. Eine kostengünstige Variante besteht in der Kombination von schwimmendem Estrich und einer federnd angebrachten Unterdecke.

Eine Beschwerung der Decke zur Verringerung der Körperschallübertragung ist durch Ersatz der Fehlbodenfüllung denkbar (siehe Abb. 103); daneben können zusätzliche Absorber im Raum über der Unterdecke eingebracht werden. Problematisch ist immer noch die direkte Körperschallübertragung durch die Tragbalken; sie kann durch eine elastische Lagerung der Bodendiele verringert werden. Unerlässlich ist eine Entkopplung des schwimmenden Estrichs von den Wänden durch elastische Fugen.

Der nach DIN 4109 erforderliche Schallschutz der Fassade gegenüber Außenlärm ist vom maßgeblichen Außenlärmpegel abhängig. Bei einem Außenlärmpegel von 66 bis 70 dB(A) ist ein Fassadenschalldämmmaß von 40 dB für Wohnräume gefordert (DIN 4109). Dies wird vom Massivmauerwerk jederzeit erfüllt, problematisch sind alte Fenster mit undichten Fugen. Durch den Einbau moderner Holzfenster mit Mehrfach-

92 Gösele, Karl (1989): Verbesserung des Schallschutzes von Holzbalkendecken bei der Modernisierung von Gebäuden. Untersuchungen im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsberichte Bau- und Wohnforschung, F 2144).

Anforderungen an den Schallschutz gegenüber Schallübertragung innerhalb von Gebäuden

nach DIN 4109 (entspricht VDI 4100 Schallschutzstufe I), erhöhte Anforderungen nach DIN 4109 Beiblatt 2, VDI 4100 SSt II und III

Bauteil	erf R'_{w} (min) in dB				erf $L'_{n,w}$ (max) in dB			
	DIN 4109	DIN 4109 Beiblatt 2	VDI 4100 SSt II	VDI 4100 SSt III	DIN 4109	DIN 4109 Beiblatt 2	VDI 4100 SSt II	VDI 4100 SSt III
Wohnungstrenndecken	54	55	56	59	53	46	46	39
Wohnungstrennwände	53	55	57	60	-	-	-	-
Wände zum Treppenhaus	52	55	56	59	-	-	53	46
Wohnungstür (mit Diele)	27	37	-	-	-	-	-	-
Decken über Kellern und Hausfluren	52	55	56	59	53	46	-	-

Anforderungen an das bewertete, resultierende Schalldämmmaß erf $R'_{w,res}$ von Außenbauteilen

für Aufenthaltsräume in Wohnungen nach DIN 4109 und VDI 4100 (nur SSt III)

Lärmpegelbereich	Maßgeblicher Außenlärmpegel in dB(A)	erf $R'_{w,res}$ (min) in dB	
		DIN 4109	SSt III
I	bis 55	30	35
II	56 bis 60	30	35
III	61 bis 65	35	40
IV	66 bis 70	40	45
V	71 bis 75	45	50
VI	76 bis 80	50	55
VII	über 80	(gesondert festzulegen)	

Tab. 13 Anforderungen an den Schallschutz im Geschosswohnungsbau nach DIN 4109 (mit erhöhten Anforderungen nach Bbl. 2) und VDI 4100 (Schallschutzstufen SSt II und III)



Abb. 102 Häusergruppe an der Walderdorffstraße (Fassade zum Innenhof des Blocks II). Hier wurden exemplarische Schallschutzmessungen zwischen den Geschossen und zwischen benachbarten Wohnungen durchgeführt. (Zeichnung: Zeitler/Wittmann)

verglasung in dichten Rahmen (Falzdichtung) lässt sich ein $R_{w,Fenster}$ von 35 dB und mehr erreichen. Bei einem Fensterflächenanteil von 30% und einem Schalldämmmaß $R_{w,Mauer}$ von 60 dB für das Mauerwerk ergibt ein resultierendes Fassadenschalldämmmaß $R'_{w,R,res}$ nach DIN 4109 Beiblatt 1 von

$$R_{w,R,res} = -10 \log_{10} \left(30\% \cdot 10^{-\frac{R_{w,Fenster}}{10}} + 70\% \cdot 10^{-\frac{R_{w,Mauerwerk}}{10}} \right) = -10 \log_{10} (30\% \cdot 10^{-3,5} + 70\% \cdot 10^{-6,0}) = 40 \text{ dB}$$

Eine nachträgliche Schallschutz-Ertüchtigung von Bestandsbauten ist meist mit hohen Kosten verbunden, wenn Decken und andere Massivbauteile betroffen sind. Daher wird hier im genossenschaftlichen Wohnungsbau und bei moderaten Wohnkosten eine umfassende Aufwertung wirtschaftlich kaum realisierbar sein. In Kapitel E werden dennoch einige Verbesserungsansätze im Rahmen der Architektonischen Modernisierung diskutiert.

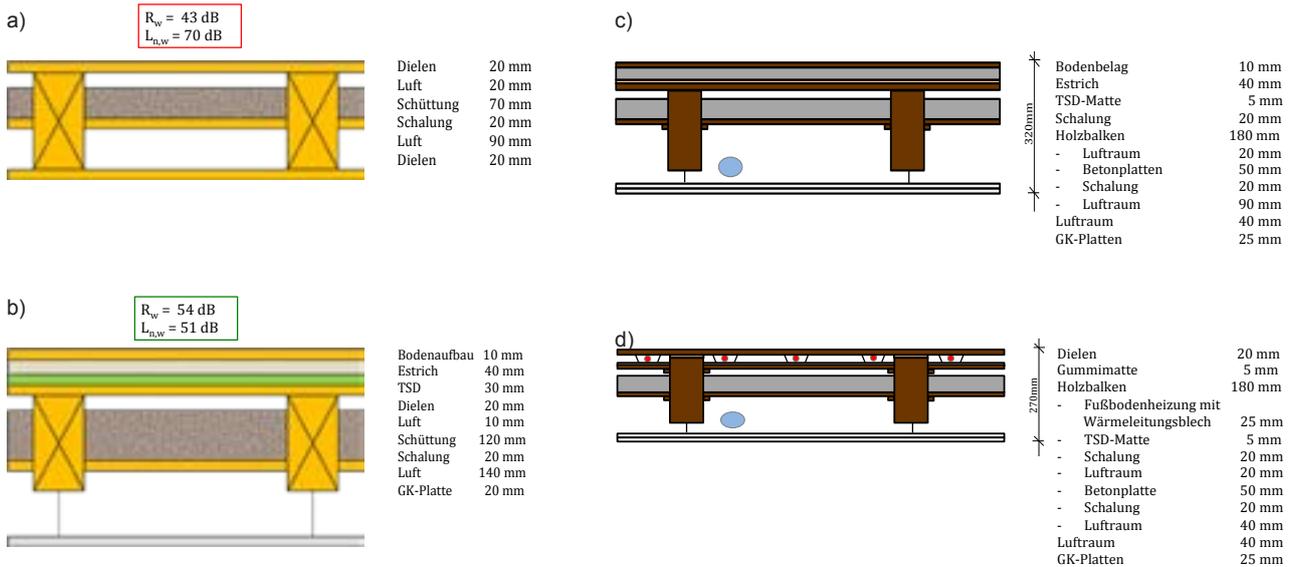


Abb. 103 a) Schallschutz-Ertüchtigung von Holzbalkendecken, ausgehend von einer Bestandssituation; b) Verbesserte Konstruktion mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke; die Schallschutzeigenschaften entsprechen den erhöhten Anforderungen der DIN 4109 Bbl. 2; c) Mit zusätzlich eingebrachten Betonplatten im Fehlboden; d) Mit einer integrierten Fußbodenheizung als Systemlösung. Hier sind sogar die Schallschutzanforderungen der Stufe II nach VDI 100 erfüllbar. Über der Deckenabhangung können zusätzliche schalldämmende Absorbermaterialien oder – Lüftungskanäle eingebracht werden.

a) Luft- und Trittschallmessung zwischen Obergeschoss und Erdgeschoss (jeweils Schlafzimmer), Walderdorffstr. 2

Decke: Parkett (Eiche), Holzbalkendecke mit gefülltem Fehlboden, Unterdecke aus verputztem Stroh

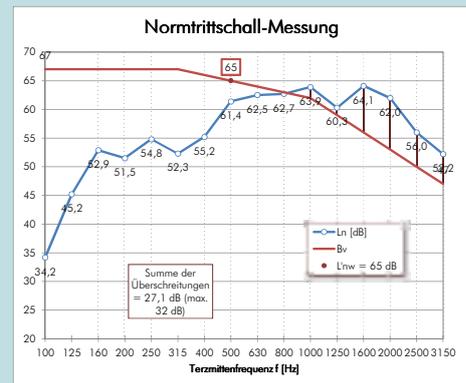
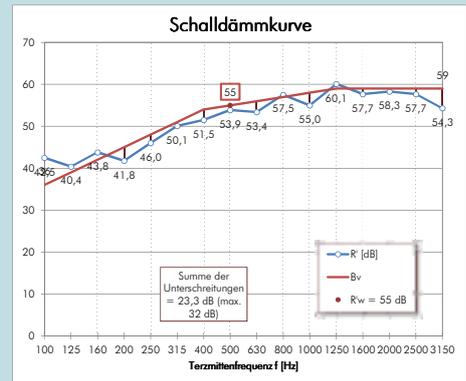
Schallübertragende Fläche: 10,0 m²
Empfangsraumvolumen: 26,4 m³

Anforderung gemäß DIN 4109 (Wohnungstrenndecke):
erf $R'_w = 54$ dB

Vorhandenes bewertetes Schalldämmmaß:
vorh $R'_w = 55$ dB (ausreichend)

Anforderung gemäß DIN 4109: erf $L'_{n,w} = 53$ dB

Vorhandener Normtrittschallpegel: vorh $L'_{n,w} = 65$ dB (zu hoch)



b) Trittschallmessung zwischen Obergeschoss und Erdgeschoss, Walderdorffstr. 2

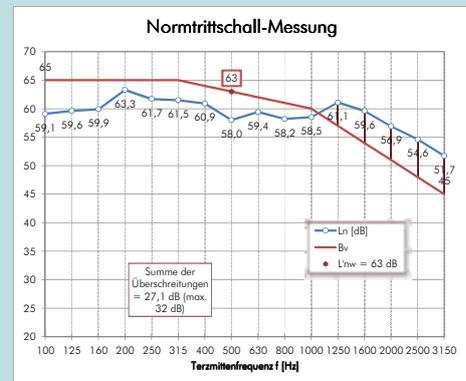
Decke: Parkett (Eiche), Holzbalkendecke mit gefülltem Fehlboden, Unterdecke aus verputztem Stroh

Schallübertragende Fläche: 17,3 m²
Empfangsraumvolumen: 46,8 m³

Anforderung gemäß DIN 4109: erf $L'_{n,w} = 53$ dB

Vorhandener Normtrittschallpegel: vorh $L'_{n,w} = 63$ dB (zu hoch)

Messung am 31.10.2012
Steffens / Höflich



c) Schalldämmmaß zwischen benachbarten Wohnungen im Erdgeschoss, Walderdorffstr. 2

Wand: Vollziegel, beidseitig verputzt

Schallübertragende Fläche: 8,2 m²
Empfangsraumvolumen: 44,8 m³

erf $R'_w = 53$ dB (Wohnungstrennwände, nach DIN 4109)

vorh $R'_w = 54$ dB (ausreichend)

Messung am 31.10.2012
Steffens / Höflich

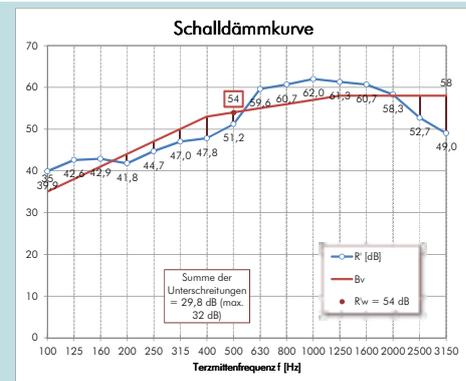


Abb. 104 Messung des Luftschalldämmmaßes (a) und des Normtrittschallpegels (b) der Holzbalkendecke zwischen 1. Obergeschoss und Erdgeschoss sowie der Luftschallübertragung (c) zwischen benachbarten Erdgeschosswohnungen



3. Berechnungen und Simulationen

3.1 Kritische Anschlussdetails

Aus bauphysikalischer Sicht ergeben sich in der Bestandssanierung mithilfe einer innenseitigen Wärmedämmung folgende Hauptproblemzonen:

- Anschluss des Daches im Traufbereich in Verbindung mit einer Dämmung der obersten Geschossdecke
- Sockel/erdberührte Bauteile in Verbindung mit einer Dämmung der Kellerdecke (Mauerwerkstrockenlegung)
- Einbindende Innenwände (Wärmebrücken);
- Holzbalkendecken, Balkenköpfe (Fäulnisgefahr bei zu hoher Holzfeuchte)
- Anschlüsse der Fenster (Wärmebrücken)
- Dämmung der strukturierten, gegliederten Fassade

Abb. 107 verdeutlicht diese Bereiche am Gebäudeschnitt.

Ausgehend von der Situation einer gegliederten, reich strukturierten Fassade verfolgen wir in Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege einen Lösungsansatz mit kapillaraktiver Innendämmung.

Im Folgenden sollen die genannten Zonen mithilfe von thermischen Berechnungen und hygrothermischen Simulationen bewertet und eine geeignete Dimensionierung der Stärke der Innendämmung ermittelt werden.

3.2 Glaser-Verfahren (Außenwand)

Zu Beginn der rechnerischen Untersuchungen wurde die Außenwand unter Einbeziehung einer 8 cm dicken Calciumsilikat-Innendämmung mit dem Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 berechnet. Das Glaser-Verfahren⁹³ ist ein eindimensionales Berechnungsverfahren, um die Tauwasser- und Verdunstungsmengen durch Wasserdampfdiffusion im Bauteil über den Jahreslauf grob abzuschätzen und zu bilanzieren. Im Vorwort der DIN

93 Glaser, Helmut (1958): Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. In: Kältetechnik 10 (11), S. 358–364 (Teil 1), (12), S. 386–390 (Teil 2).

4108-3 wird darauf hingewiesen, dass das Verfahren für Baustoffe, bei denen Feuchtespeicherung und -transport eine Rolle spielen, wenig geeignet ist. Bei Mauerwerk mit Innendämmung führt das Verfahren unter Umständen zu einer falschen Beurteilung der Situation. Da es den gängigen Feuchteschutznachweis darstellt, soll auf eine formale Glaser-Bewertung dennoch kurz eingegangen werden.

Wir betrachten die Bestandswand aus 38 cm dickem Vollziegelmauerwerk (mit beidseitig 1,5 cm Kalkzementputz), an die eine Calciumsilikat-Dämmschicht mit Gipsputz raumseitig angebracht ist (Tab. 14). Bereits ab einer Dämmstärke von 18 mm weist man eine kritische Tauwassermenge über 1,0 kg/m² nach. Dieses Wasser fällt in der Ebene zwischen der Dämmschicht und dem Bestandsinnenputz des Mauerwerks an. Die Verdunstungsmenge, die diese Tauwassermenge in jedem Fall überschreiten sollte, damit das Bauteil wieder austrocknen kann, liegt selbst bei 80 mm Dämmstärke immer über der Tauwassermenge.

Man beobachtet, ungeachtet von real vorhandenem kapillarem Wassertransport, eine besonders kritische Situation für Dämmstärken zwischen 3 und 5 cm, weil hier die höchste Tauwassermenge anfällt. Bei 8 cm Dämmstärke ist diese Menge kleiner, allerdings sinkt auch die sommerliche Verdunstungsmenge, sodass bei noch höheren Dämmstärken (ab 11 cm) die anfallende Tauwassermenge formal nicht mehr austrocknen kann.

Somit empfiehlt sich eine Dämmstärke von 8 cm, die allerdings ohne detaillierte hygrothermische Tauwasserberechnung allein mit dem Glaser-Verfahren dennoch nicht zulässig wäre, weil der Grenzwert von 1,0 kg/m² Tauwassermenge überschritten wird.

Dieser Befund wurde bereits von Binder et al. (2012)⁹⁴ festgestellt: „Das Beispiel der Calciumsilikat-Konstruktion zeigt, dass es in der Regel zu einer negativen Beurteilung von diffusionsoffenen, kapillaraktiven Systemen führt, wenn man Feuchtespeicherung und Flüssigtransport vernachlässigt. Deren Funktionsweise beruht ja gerade auf der Fähigkeit der Materialien, Feuchte sowohl zu speichern als auch über Flüssigtransport zurückzuleiten und somit den Feuchteintrag über Dampfdiffusion zu kompensieren.“

Die U-Wert-Berechnung der Konstruktionen zeigt, dass in jedem Fall eine 8 cm Innendämmung benötigt wird, um in den Bereich der Anforderungen der Energieeinsparverordnung an sanierte Altbauten zu kommen,

94 Binder, Andrea; Künzel, Hartwig; Zirkelbach, Daniel (2012): Ein abschätzender Blick in die Zukunft. Hygrothermische Simulationen. In: Bauen im Bestand B+B/Trockenbau Akustik Spezial, S. 11–17.

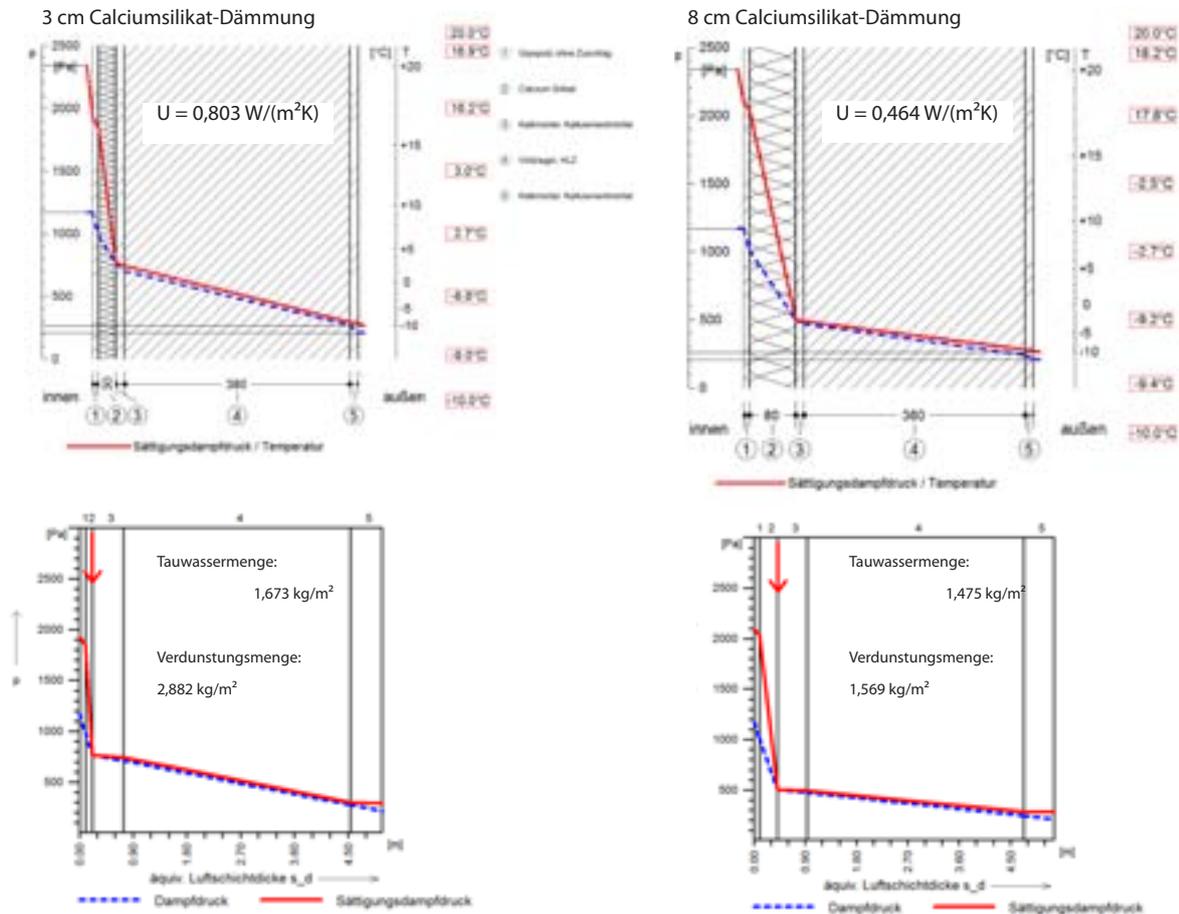


Abb. 105 Glaser-Nachweis für eine 38 cm dicke Vollziegelwand mit 3 bzw. 8 cm Calciumsilikat-Innendämmung. Oben: Wandaufbau mit Temperatur- und Partialdruckverlauf. Unten: Glaser-Diagramme über der äquivalenten Luftschichtdicke mit Tauebene (zwischen Innendämmung und Mauerwerk).

Quelle für Bilder: BMZ Technisch-Wissenschaftliche Software GmbH, Software Bautherm EnEV X 11, Tübingen (2014).

Dämmstärke CaSiO ₃ (cm)	U-Wert (W/m ² K)	Tauwassermenge (kg/m ²)	Verdunstungsmenge (kg/m ²)	DIN 4108-3 konform
0 (Bestandswand)	1,49	0,166*	1,441	ja
1,5	1,03	0,967	3,915	ja
2,0	0,94	1,354	3,494	nein
3,0	0,80	1,673	2,882	nein
5,0	0,62	1,692	2,147	nein
8,0	0,46	1,475	1,569	nein
11,0	0,37	1,254	1,248	nein

*zwischen Mauerwerk und Außenputz

Tab. 14 Vergleich der U-Werte und Tauwassermengen für unterschiedliche Dicken der Calciumsilikat-Innendämmung. Offenbar ist eine Dämmstärke zwischen 3 und 5 cm am kritischsten.

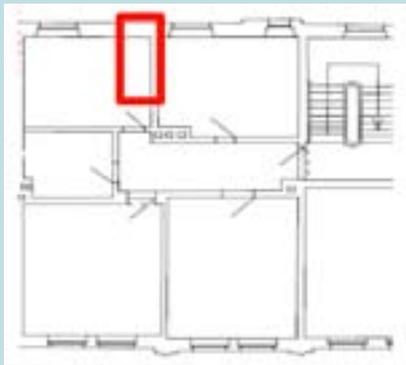
d.h. $U_{\max} = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei Erneuerung der Außenbauteile mittels Innendämmung.⁹⁵

Im Folgenden wird nun die Analyse mit thermischen Detailberechnungen und mit Simulationen des gekop-

pelten Wärme- und Feuchtetransports unter Berücksichtigung kapillarer Saugwirkung ergänzt (Höflich, 2013).⁹⁶

95 Die Anforderung gilt als erfüllt, wenn der spezifische Transmissionskoeffizient H_T den Grenzwert von $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ um nicht mehr als 40% überschreitet, d.h. max. $0,70 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ beträgt.

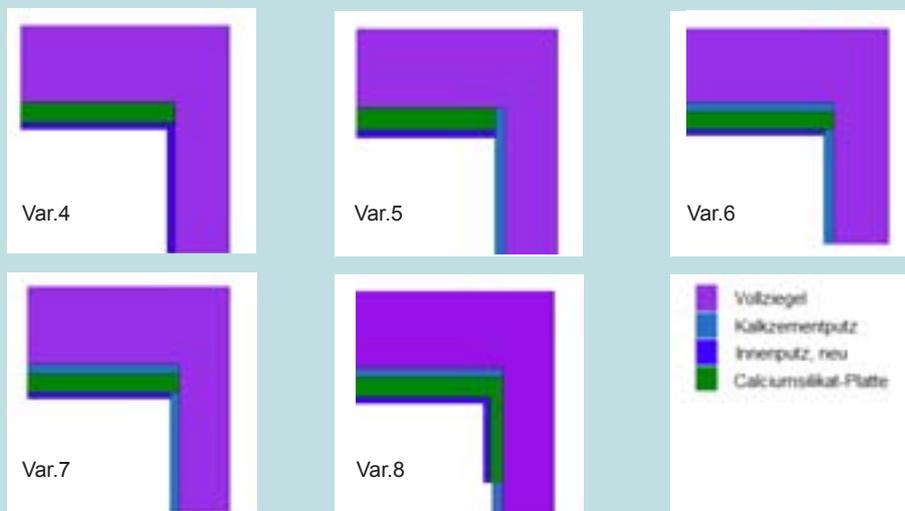
96 Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, S. 35ff.



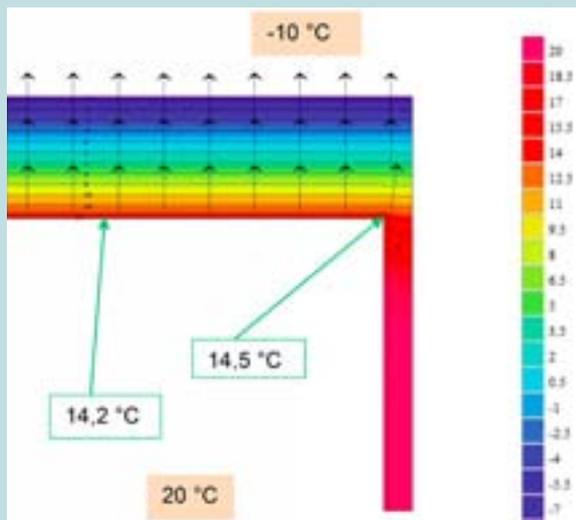
a) Grundriss (ohne Maßstab)
Quelle: A. Zeitler

Variante	Ist-Zustand	3 cm Calciumsilikat-Innendämmung							
		3 cm Calciumsilikat-Innendämmung	5 cm Calciumsilikat-Innendämmung	8 cm Calciumsilikat-Innendämmung	alter Innenputz komplett entfernt	alter Innenputz an AW entfernt	alter Innenputz an AW und an IW zum entfernt	nur 3 cm alter Innenputz an der IW entfernt	plus Dämmmaß
Oberflächen-temperatur in der Kante	14,5	13,7	13,8	14,1	14,4	13,6	14,5	14,6	16,0
Oberflächen-temperatur in der Kante hinter der Dämmung		8,8	7,1	5,1	8,1	8,8	8,4	8,5	6,2
Außenwand-oberflächen-temperatur (innen)	14,2	16,7	17,4	18,1	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
Außenwand-oberflächen-temperatur hinter der Dämmung		3,5	0,7	-2,0	3,3	3,4	3,4	3,6	3,6

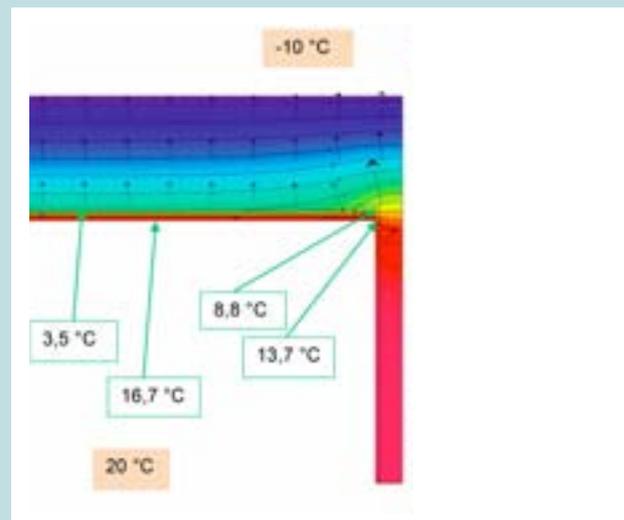
b) Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse



c) Schematische Darstellung der Gestaltungsvarianten 4 bis 8 mit 3 cm CaSiO₃-Innendämmung



d) Außenwand im bestehenden Zustand



e) Variante 1: Außenwand mit 3 cm Calciumsilikat-Innendämmung; Variante 2 und 3 unterscheiden sich nur in der Dämmstärke (5 bzw. 8 cm).

Abb. 106 Thermische Berechnungen für Varianten der Innendämmung an der Stelle einer einbindenden Innenwand. Die Abbildungen zeigen die Temperaturen in den Bauteilen und die Anschlussbedingungen an den Oberflächen bzw. Schnittflächen, inkl. Übergangswiderständen ($R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $R_{se} = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) an den Oberflächen gegen Luft. Quelle: Höflich, Daniel (2013)

3.3 Thermische Berechnungen

Zwei- und dreidimensionale Berechnungen der stationären Wärmeleitung dienen der Ermittlung von Temperaturen und Wärmeströmen im Bauteil und insbesondere der Bestimmung von Wärmebrückenverlustkoeffizienten für Wärmebrücken. Die Ergebnisse der Berechnung geben Aufschluss über das Tauwasser- und Schimmelrisiko auf Bauteiloberflächen. Weiterhin können die Temperaturverteilung innerhalb von Bauteilen oder die Wärmeverluste ermittelt werden.

In der DIN EN ISO 10211-1 und DIN EN ISO 10211-2 werden Spezifikationen für einheitliche Bedingungen festgelegt. Vorausgesetzt werden:

- stationäre Temperaturen
- temperaturunabhängige Materialparameter
- keine Wärmequellen im Bauteil

Hinsichtlich der Genauigkeit müssen kommerzielle Rechenprogramme nach EN ISO 10211-1 „Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren“ validiert sein. Die Ergebnisse entsprechen also den in EN ISO 10211-1 Anhang A dargestellten Prüferferenzfällen.

Die Ergebnisse hängen von den geometrischen und den materialspezifischen Parametern sowie von den gewählten thermischen Randbedingungen ab. Darüber hinaus erfordert eine gewünschte Genauigkeit eine entsprechend fein modellierte Struktur aus finiten Elementen. Die in den Programmdateibanken hinterlegten Materialkennwerte auf Grundlage der DIN 4108-4 wurden mit den aus den Analysen gewonnenen Eigenschaften bearbeitet bzw. ergänzt.

Die Darstellung der Isothermen in den Abbildungen Abb. 106 ff. wird in Temperaturschritten von 2 Kelvin angezeigt. Die Schnittflächen werden mit adiabaten Randbedingungen (Wärmestromdichte $q = 0$) belegt; somit findet über diese Schnittflächen kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt, sie stellen, anschaulich gesprochen, Spiegelebenen dar.

Die kritische Luftfeuchte für Schimmelpilzbildung auf einer Bauteiloberfläche ist 80% (Schimmelpilzschwelle DIN 4108-2). Wie bereits erwähnt, entspricht dies bei einer relativen Luftfeuchte von 50% bei 20°C Raumlufttemperatur einer maximal zulässigen Oberflächentemperatur von 12,6°C.

3.3.1 Einbindende Innenwand

Eine typische geometrische Wärmebrücke ist die auf eine Außenwand stoßende Innenwand (einbindende Innenwand). Es folgt eine Berechnung für die Vollziegelaußenwand mit einer angrenzenden Vollziegelinnenwand (Abb. 106 a)). Aus Symmetriegründen wird die Innenwand in der Mitte abgeschnitten (adiabate Randbedingung zum Nachbarraum).

Um das größere Schimmelpilzrisiko bei dauerhafter Überschreitung von 80% Oberflächenfeuchte deutlicher abzubilden, wurde hier (abweichend von DIN 4108-3) eine Außentemperatur von -10°C angesetzt. Dies trägt auch dem Umstand Rechnung, dass die lokalen Außentemperaturen an mehr als vier aufeinander folgenden Tagen unter -5°C liegen können.

Situation im Bestand

Tab. 15 spezifiziert den Außenwandaufbau im Bestand von innen nach außen.

Die Temperatur in der Anschlusskante beträgt $14,5^{\circ}\text{C}$ und die Temperatur an der Innenoberfläche der Außenwand $14,2^{\circ}\text{C}$ (Abb. 106 d)). Dass diese in der Kante niedriger ist, liegt daran, dass der mineralische Innenputz eine bessere Wärmeleitfähigkeit hat als der Vollziegel der Wand.

In diesem Fall besteht mit den vorgegebenen Werten keine formale Schimmelgefahr, da die Temperaturen über $12,6^{\circ}\text{C}$ liegen. Dennoch kann es beispielsweise durch das Nutzerverhalten zu einer höheren Luftfeuchte im Raum kommen, was dann zu einer Erhöhung der Schimmelpilzschwelle führen würde.

Variante 1: 3 cm Calciumsilikat-Innendämmung

Es folgt eine Berechnung für dieselbe Struktur, allerdings mit einer 3 cm dicken Calciumsilikat-Innendämmung und einem neuen Innenputz (Tab. 16). Der alte Innenputz darunter und der an der einbindenden Innenwand wird beibehalten.

Man findet eine Temperatur an der Einbindestelle von $13,7^{\circ}\text{C}$. Hinter der Dämmung in der Kante hat man eine

Außenwand	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Dicke d [m]
Kalkzementputz	1800	1,00	0,015
Vollziegel	1820	0,81	0,380
Kalkzementputz	1800	1,00	0,015

Tab. 15 Aufbau der unsanierten Außenwand



Außenwand	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Dicke d [m]
Gipsputz	1800	1,00	0,015
CaSiO ₃ -Platte	270	0,055	0,030
Kalkzementputz	1800	1,00	0,015
Vollziegel	1820	0,81	0,380
Kalkzementputz	1800	1,00	0,015

Tab. 16 Aufbau der Außenwand mit 3 cm starker Calciumsilikat-Dämmung

Temperatur von 8,8°C. Die raumseitige Wandoberfläche liegt bei 16,7°C und hinter der Dämmung bei 3,5°C (Abb. 106 e).

Var. 2 und 3: 5 bzw. 8 cm Calciumsilikat-Dämmung

Mit wachsender Dämmstärke erhält man erwartungsgemäß höhere Temperaturen an der Innenoberfläche und Kante und niedrigere Temperaturen hinter der Dämmung. Hier lassen sich im raumseitigen Anschlussbereich Oberflächentemperaturen von 13,8°C bzw. 14,1°C erzielen. Die Ergebnisse sind in Abb. 106 b zusammengefasst.

Offenbar stellen Dämmstärken um 3 cm ohne weitere Maßnahmen eine besonders ungünstige Situation dar, die zu niedrigeren Kantentemperaturen führt als ohne Dämmung bzw. mit dickerer Dämmung.

Es wurden weitere Varianten für den Anschluss einer Innendämmung berechnet, in Anlehnung an Oswald et al. (2011)⁹⁷; siehe Abb. 106 c.

Variante 4: Der alte Innenputz wird komplett entfernt, eine 3 cm dicke Calciumsilikat-Innendämmung direkt auf der Außenwand angebracht und mit einem neuen 1 cm starken mineralischen Innenputz verkleidet. Im Vergleich zu Variante 1 stellt sich in der Kante raumseitig eine deutlich höhere Temperatur ein (14,4°C statt 13,7°C), hinter der Dämmung fällt die Temperatur von 8,8°C auf 8,1°C. Im Wandbereich ändert sich wenig.

Variante 5: Hier wird nur der alte Innenputz der Außenwand entfernt, der an der Innenwand wird belassen. Auf der Außenwand ist eine 3 cm Calciumsilikat-Innendämmung mit neuem Innenputz aufgebracht. In der Kante ergibt sich eine Temperatur von 13,6°C, in der Kante hinter der Dämmung 8,8°C (ähnlich Variante 1). Offenbar ist der Putz der Innenwand zwischen Dämmung und Innenwand-Mauerwerk entscheidend für die niedrigere Temperatur im Kantenbereich. Er wirkt

97 Oswald, Rainer; Zöller, Matthias; Liebert, Géraldine; Sous, Silke (2011): Und sie funktionieren doch. Innendämmung – Detaillösungen. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (2), S. 48–53.

als Wärmebrücke.

Variante 6: Zusätzlich zu den Maßnahmen in Variante 5 wird der alte Putz der Innenwand im Bereich der Dämmung entfernt, sodass diese auch im Anschlussbereich direkten Kontakt zum Mauerwerk hat. Damit ergibt sich für die Innenkante 14,5°C (wie Variante 4) und hinter der Dämmung 8,4°C.

Variante 7: Diese Variante ist ähnlich der Variante 1 mit den alten Putzschichten, nur dass hier 3 cm des alten Innenputzes entlang der Innenwand entfernt wurden wie in Variante 6. Für die Kante ergibt sich eine Temperatur von 14,6°C und hinter der Dämmung 8,5°C.

Variante 8: Ähnlicher Aufbau wie Variante 7, aber hier mit einem „Dämmkeil“, d. h. einem 2 cm starken und 50 cm langen Dämmstreifen aus Calciumsilikat entlang der Innenwand. An der Stelle der Innenwand, auf der der zusätzliche Dämmstreifen angebracht wird, wird der alte Innenputz entfernt, auch um einen noch dickeren Versatz in der Wand zu vermeiden. In diesem Fall erhält man raumseitig 16,0°C in der Kante und 6,2°C hinter der Dämmung.

Fazit

Entscheidend für die raumseitige Oberflächentemperatur im Anschlussbereich und damit für die Reduktion von Schimmelbildung ist die Unterbrechung des alten Putzes auf der einbindenden Innenwand. Diese kann durch einen verlängerten Dämmkeil noch deutlich erhöht werden im Vergleich zur Bestandssituation (16,0°C statt 14,5°C), hinter der Dämmung wird die Temperatur von ca. 8,4°C (ohne Dämmkeil) auf 6,2°C abgesenkt. Nachdem Temperaturabsenkungen der Raumumschließungsflächen gegenüber der Raumluft von mehr als 3 Kelvin oft mit unangenehmen Zugempfindungen verbunden sind, ist der Dämmkeil hier von Vorteil.

Der Vergleich von Variante 2 und 5 zeigt, dass man statt mit einer 5 cm Calciumsilikatplatte auch mit 3 cm Calciumsilikat-Innendämmung auskommt, wenn die Wärmebrücke durch den Innenwandputz entfernt wird. Bei allen Varianten entsteht kein Schimmelpilzproblem vor der Dämmung. Allerdings liegen die Temperaturen hinter der Dämmung im kritischen Bereich. Es sollte daher ein dampfdichter Anschluss gewährleistet sein, sonst besteht die Gefahr des Wasserdampf-Hinterströmens mit vermehrtem Tauwasserausfall. Die Kapillaraktivität des Dämmmaterials kann dieses Risiko jedoch kompensieren.

In jedem Fall ist auch bei Calciumsilikat auf eine fachgerechte, vollflächige Verklebung und dichte Verfugung der Platten zu achten, um Hohlräume zu vermeiden. Diese können sonst als „Kondensatfalle“ wirken.⁹⁸

3.3.2 Kellerdecke und Sockelbereich

Eine typische Deckenkonstruktion der Zwischenkriegszeit ist die sog. Preußische Kappendecke mit Stahlträgern und einer aus Ziegeln gemauerten Wölbung. In unserem Beispiel haben die Stahlträger eine Flanschbreite von ca. 8 cm. Die Abstände der Stahlträger betragen (gemessen) ca. 120 cm, wobei diese variieren. Aufgrund der Flanschbreite von 8 cm kann man auf ein I-Eisen-Profil schließen, welches eine Breite von 8,2 cm hat. Der restliche Aufbau wurde mithilfe von zeitgenössisch-typischen Konstruktionsmerkmalen aus der Literatur (Maier 2011)⁹⁹ modelliert.

Situation im Bestand

Tab. 17 zeigt den Aufbau der unsanierten Außenwände im Kellerbereich sowie der Kellerdecke.

Eine Schnittzeichnung aus den historischen Planunterlagen (Abb. 107 a) hilft bei der Orientierung für die in Abb. 107 c gezeigte Temperaturverteilung aus der thermischen Berechnung. Die Temperatur in der Fußbodenkante des Erdgeschosses beträgt 9,3°C. Der Fußboden liegt im Bereich von 16,1°C bis 17,4°C. Die

98 Messal, Constanze (2014): Wo Schimmelpilze im Verborgenen wachsen. Versteckten Schimmelpilz nachweisen, Teil 2. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (6), S. 67–69.

99 Maier, Josef (2011): Energetische Sanierung von Altbauten. 2., ergänzte Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Dicke d [m]
Außenwand (oben)			
Kalkzementputz	1800	1	0,015
Vollziegel	1820	0,81	0,38
Calciumsilikat-Platte	270	0,055	0,03
Mineralischer Innenputz	1500	0,47	0,01
Außenwand (unten)			
Kalksandstein*	1600	0,79	0,2
Beton	2200	1,65	0,35
Kellerdecke			
Dielung	500	0,13	0,03
Lagerholz	500	0,13	0,07 x 0,10
Lose Schüttung/Sand	1800	0,7	0,12
Beton	2200	1,65	
Vollziegel	1820	0,81	0,12 x 0,065

* Kalksandstein nur bis OK Gelände

Tab. 17 Aufbau der unsanierten Kellerwände und der Kellerdecke

Temperaturen der Stahlträger sind 7,2°C (oben) und 5,9°C (unten). Damit liegt die Bodenkante bereits unterhalb von 12,6°C, wonach hier Schimmelpilzwachstum zu erwarten ist.

Variante 1: 3 cm Innendämmung an der Außenwand

Mit dieser Innendämmung (Variante 1, Abb. 107 d) erhöht sich die Temperatur in der Bodenkante auf 12,1°C. Die Temperatur hinter der Dämmung beträgt 2,1°C in der Nähe der Kante. Die Fußbodentemperatur bleibt annähernd gleich mit 15,9°C bis 17,4°C. Die Temperatur der Stahlträger liegt wie zuvor bei 7,2°C (oben) und 5,9°C (unten). Die Temperatur in der Kante liegt immer noch im schimmelpilzkritischen Bereich.

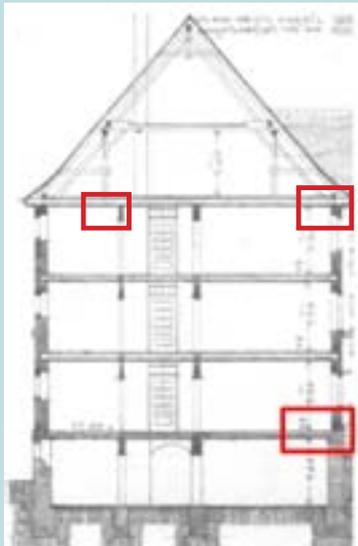
Dämmung der Kellerdecke

Da die Kellerdecke, als unterer Abschluss der beheizten Gebäudehülle, nur einen geringen Wärmeschutz aufweist, werden hier hohe Heizenergieverluste verursacht. Um diesen Energieverlust zu vermeiden, sollte entweder über der Kellerdecke oder unter der Kellerdecke gedämmt werden.

Durch eine Dämmung oberhalb der Decke, beispielsweise im Hohlraum, geht keine Raumhöhe im Keller verloren und es gibt keine Schwierigkeiten mit Installationsleitungen. Falls eine lose Schüttung vorhanden ist, kann diese ausgetauscht und mit geeignetem Dämmmaterial ersetzt werden, wenn beispielsweise ohnehin im Zuge der Renovierung der Fußbodenaufbau erneuert wird. Eventuell fallen aber Folgearbeiten, wie das Kürzen von Türen, das Anheben von Heizkörpern oder das Erhöhen von Geländern an. Wenn keine Schüttung vorhanden ist, hätte dies den Vorteil, dass der Fußboden nur minimal geöffnet bzw. aufgebohrt werden müsste und Dämmmaterial, z. B. Perlite oder granuliertes Mineralwolle, welche nachträglich in Flockenform aus kunstharzgebundener Steinwolle hergestellt wird, in die Hohlräume eingeblasen werden kann.

Als Referenz wurde neben der Bestandssituation (Ist-Situation) die Variante 1 berechnet; diese enthält nur die Dämmung der Außenwand, keine Kellerdecken-dämmung (Abb. 107).

Variante 2: Die Dämmung der Außenwand bleibt mit 3 cm starken Calciumsilikatplatten erhalten. Die Kellerdecke wird mit Blähperlit, ca. 7 cm, zwischen den Lagerhölzern ($\rho = 100 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,06 \text{ W/(m·K)}$) gedämmt. Es ergibt sich eine Oberflächentemperatur in der Kante von 14,0°C und an selber Stelle hinter der Calciumsili-

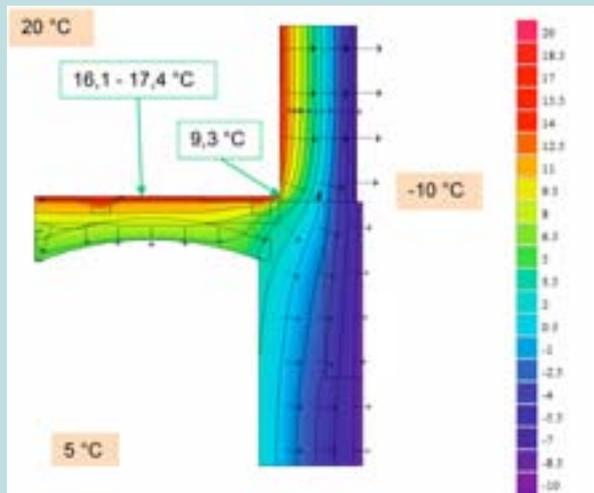


a) Schnitt (ohne Maßstab)

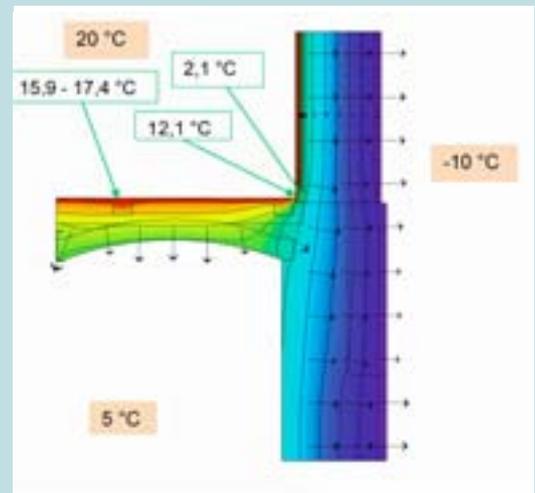
Quelle: Gemeinnütziger Bauverein Regensburg e. V.

Varianten	Ist-Zustand	3 cm Calciumsilikat-Innendämmung				8 cm Calciumsilikat-Innendämmung			
		1 ohne Dämmung der Kellerdecke mit 7 cm Perlitschüttung zw. den Lagerböden	2 mit 8 cm Mineralwolle- Dämmplatten unter der Decke	3 beide Dämmvarianten der Kellerdecke	4	5 ohne Dämmung der Kellerdecke mit 7 cm Perlitschüttung zw. den Lagerböden	6 mit 8 cm Mineralwolle- Dämmplatten unter der Decke	7 beide Dämmvarianten der Kellerdecke	8
Oberflächentemp. der Bodenkante	9,3	12,1	14,0	12,3	13,9	13,2	15,5	13,8	15,4
Oberflächentemp. der Bodenkante hinter der Dämmung		2,1	1,0	2,5	0,7	0,0	-1,5	0,0	-1,9
Temperatur am Fußboden	16,1	15,9	17,9	16,5	18,8	15,9	17,9	16,5	18,8
	17,4	17,4	18,6	19,1	19,2	17,5	18,6	19,1	19,2
Temperatur Stahlträger (oben)	7,2	7,2	6,0	15,9	12,4	7,2	6,0	15,9	12,4
Temperatur Stahlträger (unten)	5,9	5,9	5,4	15,5	12,2	5,9	5,4	15,5	12,2

b) Ergebnisse der Varianten



c) Kellerdecke und Sockelbereich im bestehenden Zustand



d) Außenwand mit 3 cm Innendämmung (Variante 1)

Abb. 107 Thermische Berechnungen für die Kellerdecke und den Sockelanschlussbereich. Die Abbildungen zeigen die Temperaturen in den Bauteilen. Die schwarzen Pfeile verdeutlichen die Wärmestromdichte durch das Bauteil.
Quelle: Höflich, Daniel (2013)

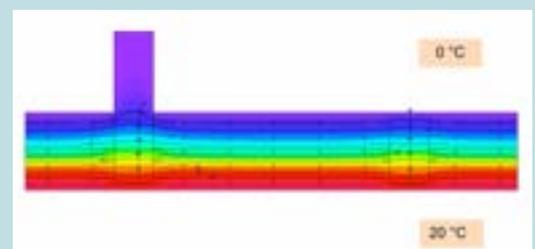
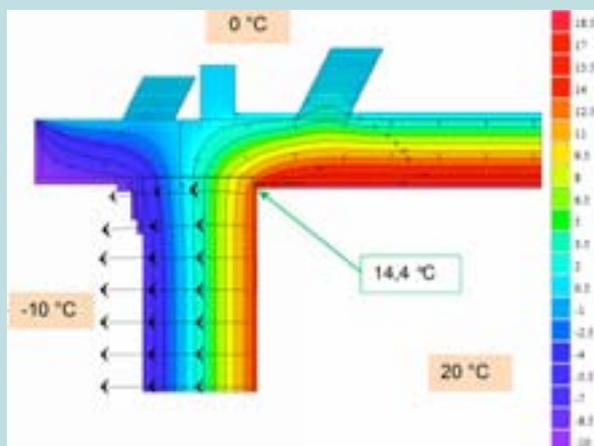


Abb. 108 Thermische Berechnungen für die oberste Geschossdecke im unsanierten Zustand; rechts quer zu den Balken, mit Durchdringung eines Balkens im stehenden Stuhl
Quelle: Höflich, Daniel (2013)

katdämmung von 1,0°C. Die Temperatur am Fußboden liegt zwischen 17,9°C und 18,6°C. Der Stahlträger hat eine Temperatur von 5,4°C (unten) und 6,0°C (oben).

Unter Zuhilfenahme einer zusätzlichen Tragkonstruktion oder mit biegsamen Dämmplatten können gewölbte Decken von unten gedämmt werden.

Als Variante für die Kellerdeckendämmung wurde zudem eine etwa 8 cm dicke biegsame Mineralwolle-Dämmplatte ($\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) betrachtet, die von unten an die Decke angebracht ist; in Variante 3 erfolgt dies anstelle der Blähperlit-Schüttung, in Variante 4 in Kombination damit. Die Ergebnisse sind in Abb. 107 b zusammengefasst.

8 cm starke Calciumsilikat-Dämmung

Variante 5: Der Aufbau entspricht dem der Variante 1, allerdings mit 8 cm starker Calciumsilikat-Innendämmung. Die Temperatur beträgt 13,2°C in der Bodenkante und 0,0°C hinter der Calciumsilikatplatte. Die Fußbodentemperatur liegt zwischen 15,9°C und 17,5°C. Die Oberflächentemperaturen der Stahlträger bleiben unverändert.

Varianten 6 und 7 entsprechen den Varianten 2 und 3 mit jeweils 8 cm Innendämmung. Die resultierenden Temperaturen sind ebenfalls in Abb. 107 b zusammengestellt. Fußbodentemperatur und Stahlträgertemperatur ergeben sich wie in Variante 2 und 3.

Variante 8: Variante 4 mit 8 cm Innendämmung ergibt vor der Calciumsilikatplatte Temperaturen von 15,4°C und -1,9°C dahinter. Bei der Temperatur hinsichtlich der Bodenoberfläche und des Stahlträgers ändert sich nichts im Vergleich zu Variante 4.

Fazit: Alle Varianten mit der 8 cm Calciumsilikat-Innendämmung an der Außenwand liegen über 12,6°C in der Bodenkante. Dies lässt sich mit 3 cm Dämmstärke auch erreichen, sofern dies mit einer Kellerdeckendämmung kombiniert wird, die direkt unter der Dielung liegt (Perlite-Schüttung, Varianten 2 und 4). Die Schüttung wirkt dann wie ein „Dämmkeil“, da sie mit der Innendämmplatte in Verbindung steht.

Als thermisch günstigste Lösung stellt sich eine 8 cm dicke Innendämmung mit einer 7 cm Perlit-Dämmung oberhalb der Kellerdecke zwischen den Lagerhölzern dar.

3.3.3 Oberste Geschossdecke

Aufgrund von diversen Wärmebrücken ist der Anschluss der obersten Geschossdecke im Traufbereich ein bauphysikalisch kritisches Detail. Abb. 108 zeigt die Temperaturverteilung (Isothermen) aus der Berech-

nung für die Bestandssituation im Plato-Wild-Ensemble (Aufbau in Tab. 18).

Über der Holzbalkendecke ist bereits eine 9 cm dicke Polystyrol-Dämmung aus Sanierungsmaßnahmen im späten 20. Jahrhundert vorhanden.

In der oberen Kante hin zum kalten Dachraum (0°C) beträgt die Temperatur an der innenseitigen Oberfläche 14,4°C.

Sanierungsvarianten

Die zwei Details wurden einerseits mit der Calciumsilikat-Dämmung an der Innenseite der Außenwand und andererseits mit einer zusätzlichen Dämmung der obersten Geschossdecke berechnet.

Die Dämmung der obersten Geschossdecke kann aus einer Dämmung zwischen den Balken, einer Dämmung auf der Geschossdecke oder aus beidem bestehen (Tab. 18).

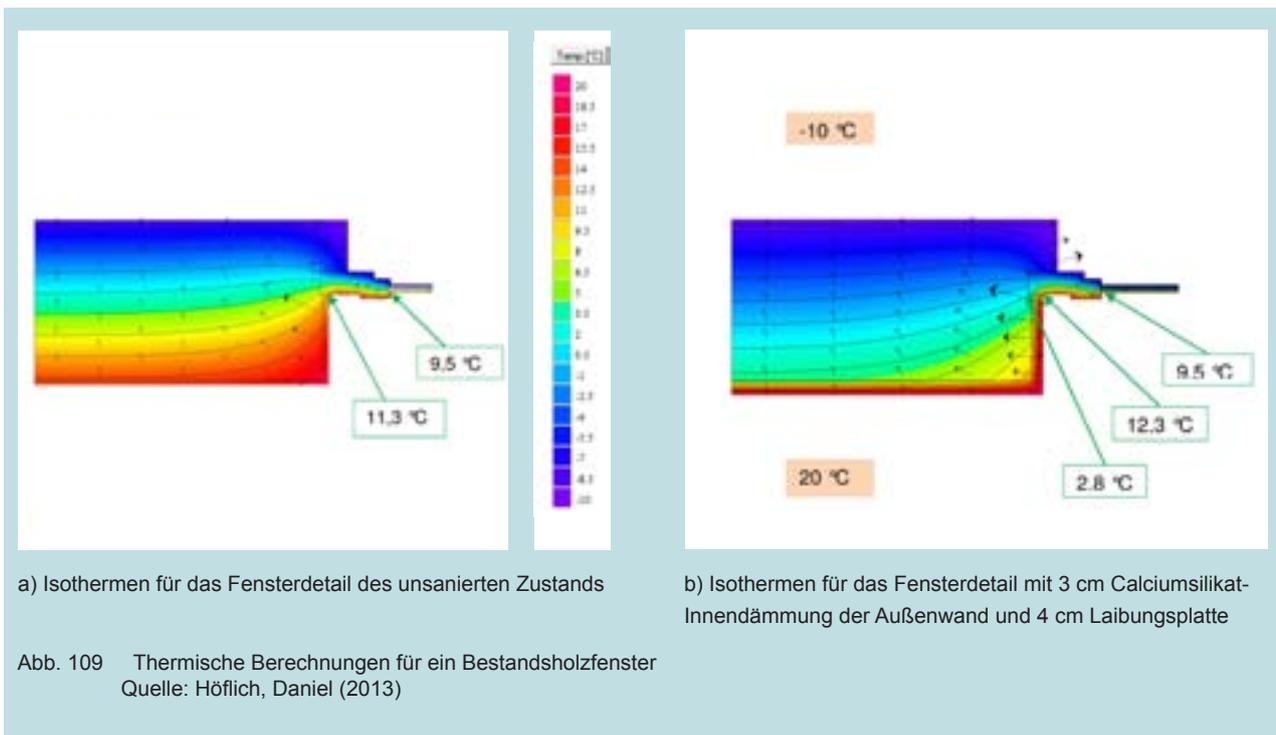
Die betrachtete Oberflächentemperatur in der Kante liegt sowohl im unsanierten Zustand als auch bei den verschiedenen Varianten immer im unkritischen Bereich. Hinter der Dämmung kommt es zu sehr niedrigen Temperaturen. Daher muss die Abdichtung am Anschluss gewährleistet sein, sonst besteht die Gefahr des Wasserdampf-Hinterströmens mit vermehrtem Tauwasserausfall. Ähnlich wie bei den Details zuvor ist auch hier 8 cm Calciumsilikat-Innendämmung, ggf. mit einer Art Dämmkeil bzw. nahtlosem Übergang zur Deckendämmung, zu empfehlen.

3.3.4 Fensterdetail

Im Folgenden wird ein horizontal geschnittenes Fensterdetail betrachtet. Die Fenster am Objekt Walderdorffstraße sind Holzfenster aus den 1980er-Jahren, aus Fichte mit Isolierverglasung (Tab. 19). Es wurde ein

	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]	Dicke d [m]
Außenwand (oben)			
Kalkzementputz	1800	1	0,015
Vollziegel	1820	0,81	0,38
Kalkzementputz	1800	1	0,015
Geschossdecke			
Spanplatte	600	0,14	0,025
Luftraum	1,23	0,025	0,01
Polystyrolschaum	27	0,04	0,09
Einschiebling	500	0,13	0,02
Balken	500	0,13	0,20 x 0,135
Luftraum	1,23	0,025	0,08
Lattung	500	0,13	0,02
Schilfmatte	170	0,047	0,005
Deckenputz	1800	1,00	0,015

Tab. 18 Aufbau von Außenwand und oberster Geschossdecke im Bestand



U-Wert von $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ angenommen.

Die Minimaltemperatur zwischen Fensterrahmen und Wand beträgt $11,3^\circ\text{C}$. Beim Übergang des Holzrahmens zum Fensterglas ergibt sich $9,5^\circ\text{C}$ (Abb. 109). Damit ist die schimmelpilzkritische Temperatur unterschritten; Schimmelpilzwachstum kann an vielen Fenstern, insbesondere unter der Rauhfasertapete beobachtet werden (siehe Abb. 87).

Sanierungsvarianten

An einem Holzfenster mit 3 cm Calciumsilikat-Innendämmung an der Außenwand und einer 2 cm dicken Laibungsplatte steigt die Oberflächentemperatur an der Kante um ein Grad im Vergleich zur Bestandssituation, also auf $12,3^\circ\text{C}$. Hinter der Dämmung sind es allerdings nur $2,8^\circ\text{C}$. Am Übergang Holzrahmen zur Glasscheibe gibt es keine Veränderung.

Erst bei einem Einbau einer 4 cm starken Laibungsplatte steigt die Temperatur auf knapp über $12,6^\circ\text{C}$. Hierfür ist der verfügbare Raum zwischen Laibung und Fensterflügeln zu knapp.

Wird die Stärke der Innendämmung auf 8 cm an der Außenwandinnenfläche bei gleichbleibender Fensterlaibungsstärke von 2 cm geändert, ergibt sich eine Temperatur in der Kante am Übergang Wand zu Fensterrahmen von $11,9^\circ\text{C}$ und hinter der Dämmung von $1,6^\circ\text{C}$. Durch die noch dickere Innendämmung kühlt die Ziegelwand weiter ab und an der Rahmenkante entsteht eine niedrigere Temperatur. An der Kante Glasscheibe hat man wieder $9,5^\circ\text{C}$.

Zusammenfassung

Neben einem möglichst dichten Anschluss der Dämmung ist dringend auch ein Austausch der Fenster zu empfehlen. Die Temperaturen sind nicht nur hinter der Dämmung, sondern auch an der raumseitigen Rahmenkante im kritischen Bereich. Neue Fenster weisen zudem deutlich bessere U-Werte um $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf.

Während sich bei nachträglicher Außendämmung durch Versatz der Fenster in die Dämmebene hinein die Wärmebrücken deutlich entschärfen lassen,¹⁰⁰ ist dies im Fall der Innendämmung nicht möglich. Hier kann nur mit der betrachteten Laibungsplatte in Verbindung mit besser gedämmten Fensterrahmen (Doppelrahmen mit Zwischendämmung) eine Verbesserung erzielt werden. Wehle und Geyer (2014)¹⁰¹ haben Forschungen zur energetischen Sanierung historischer

100 Jehl, Wolfgang (2013): Anschluss gesucht und gefunden. Fenstermontagen in Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS). In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (5), S. 32–35

101 Wehle, Barbara; Geyer, Christoph (2014): Den Schutz verbessern, die Schönheit bewahren. Energetische Sanierung historischer Fenster. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (3.), S. 58–63.

	Rohdichte ρ [kg/m^3]	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	Dicke d [m]
Fenster			
Holzrahmen (Fichte)	500	0,13	-
Zweischeibenisoliertglas			
Floatglas	2500	1	0,004
Luftschicht	1,23	0,07	0,014
Floatglas	2500	1,00	0,004

Tab. 19 Aufbau der Fenster im Bestand

Fenster angestellt. Die Berner Fachhochschule bietet dazu in einer Projektdatenbank umfangreiche Informationen und Berechnungstools an.¹⁰² Im vorliegenden Fall ist allerdings eher ein Ersatz der Holzfenster durch entstehungszeitlich typische Sprossenfenster vorzunehmen.

3.3.5 Holzbalkendecke (mit Sockelheizung)

Abschließend sollen nun detaillierte thermische Untersuchungen der Wärmebrücke im Anschlussbereich der Holzbalkendecken an den Außenwänden diskutiert werden (Gering 2014).¹⁰³ Hierbei sollen vor allem die Auswirkungen auf die Temperatur der Balkenköpfe diskutiert werden, die in Abhängigkeit des Heizsystems, der Materialeigenschaft und Detailausführung sehr unterschiedlich sein können. Aus Temperaturfeld, Wärmestrom und Wärmebrückenkoeffizienten können Schlussfolgerungen über Tauwasser- und Schimmelrisiken auf den Bauteiloberflächen getroffen werden.

Neben der Ausgangssituation wird insbesondere der Einfluss einer Wandheizung im Sockelbereich betrachtet. Diese soll einerseits als Raumheizung dienen, andererseits unkritische Temperaturen im Bereich der Holzbalkenköpfe im Mauerwerk sicherstellen.

Randbedingungen

Für die durchgeführten Simulationen gelten die in DIN EN ISO 10211 spezifizierten Randbedingungen: Raumlufttemperatur 20 °C, Außenluft –5 °C. Die Materialparameter sind in Tab. 20 aufgeführt.

Abb. 110 a und b zeigen die Modellstruktur mit den zugehörigen Parametern. In den Materialschnittflächen findet kein Wärmeaustausch statt, deshalb wird hier eine adiabatische Randbedingung ($q = 0$) festgelegt. Die kritischen Temperaturen am Balkenkopf werden mit T1 und T2 gekennzeichnet. Die Position für den ungünstigsten f_{Rsi} -Wert (siehe Abb. 110), also den Ort mit der niedrigsten Oberflächentemperatur, wird mit T3 markiert.

Abb. 110 a stellt die Struktur und das Ergebnis für die unsanierte Bestandssituation dar (Struktur A). Der

¹⁰² Im Internet: <http://www.bfh.ch/forschung/projektdatenbank.html>; <https://projektdatenbank.bfh.ch/search/pdbwebview-detail.aspx?lang=de&projectid=5a5e0d40-c99c-4261-bf65-8eb0c66713aa&instId=3898707e-4722-4b93-9c06-c0a2784a7ab1> (zuletzt geprüft am 12.11.2014).

¹⁰³ Gering, Stefan (2014): Thermische Detailsimulationen in der Bestandssanierung. Bachelorarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

Temperaturfaktor von $f_{Rsi} = 0,65$ (unter 0,7) im Bestand signalisiert ein hohes Schimmelpilzrisiko mit einer Oberflächentemperatur unter 12,6 °C. Die Bestandskonstruktion weist am Balkenkopf (T1 und T2) eine Temperatur um 2 °C auf. Wärme aus dem Rauminnen strömt zur Außenseite und erwärmt dabei die Mauerwerkswand. Der Holzbalkenkopf ist von einem 2 cm dicken Luftspalt umgeben, der bis ins Rauminnere reicht und dort auf eine Breite von 0,5 cm schrumpft. Der Luftspalt wirkt wärmedämmend und trennt den Punkt T1 vom Mauerwerk ab, sodass die Wärme hauptsächlich durch das schlechter leitende Holz dorthin gelangt, während T2 von der direkten Umgebung des besser wärmeleitenden Mauerwerks auf etwas höherer Temperatur gehalten wird.

Dagegen zeigt Abb. 110 b die Situation mit einer 8 cm dicken Calciumsilikat-Innendämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,055 W/(m·K), Struktur B). Hier kühlt die dahinter liegende Wand deutlich ab. Im Vergleich zur Ausgangssituation fällt die Temperatur am Balkenkopf in den negativen Bereich und liegt an T1 und T2 bei einem nahezu gleichen Wert von –1,85 °C. Dies liegt an dem deutlich höheren Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung, die dem Mauerwerk vorgelagert ist, sodass die Wärme zu den Punkten T1 und T2 einen vergleichbaren Widerstand durchläuft. Schimmelpilzbildung an der raumseitigen Oberfläche ist bei dieser Konstruktion unwahrscheinlich, da f_{Rsi} mit 0,76 (bzw. die Oberflächentemperatur mit 14,1 °C) am kältesten

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]
Kalkzementputz (innen und außen)	1,000
Mauerwerk	0,810
Holzterrazzo (Kalkzement/Holz)	0,570
Lattung (Holz)	0,130
Schalung (Holz)	0,130
Schilfmatte	0,055
Kalkputz (Decke)	0,080
Luftschichten	0,110
Klebemörtel (für CaSiO ₃ -Dämmung)	0,920
Calciumsilikat (CaSiO ₃)	0,055
Armierungsmörtel (für CaSiO ₃)	0,570
Compriband (PU)	0,054
Hanf-Filz	0,047

Tab. 20 Materialparameter für die Detailberechnung
Quelle: Gering, Stefan (2014)

Punkt T3 im unkritischen Bereich liegt.

Eine Modifikation im Anschluss der Dämmung zeigt Abb. 110 c (Struktur C). Hier ist die Dämmung direkt bis zum Holzbalken (bzw. um ihn herum) geführt. Dadurch wird die Dämmung im Bereich der Balkendurchdringung nochmals erhöht und niedrigere Balkenkopftemperaturen sind zu erwarten. Vorteilhaft ist, dass der f_{Rsi} -Wert auf 0,83 steigt (höhere Oberflächentemperatur von 15,8 °C an der kältesten Stelle).

Integration einer Sockelheizung

Der möglicherweise schädliche Einfluss einer Innendämmung auf die Holzbalkenköpfe wird mit vermehrter Holzfeuchte infolge der niedrigeren Temperaturen am Balkenkopf und entsprechend erhöhter Luftfeuchte in Verbindung gebracht. Umfangreiche Studien haben dieses Thema behandelt und werden im Kapitel E (Architektonische Modernisierung) diskutiert.

Um eine grundsätzliche Erhöhung der Temperatur am Holzbalkenkopf zu erzielen, wurde ein Sockelheizungskonzept untersucht, das im Sockelbereich in die Innendämmung integriert wird. Genauere thermische Simulationen der Temperaturverhältnisse und Erfahrungswerte von Herstellern derartiger Systeme ergaben als sinnvolle Annahme eine Oberflächentemperatur von ca. 35 °C hinter dem Heizelement. Mit dieser Oberflächentemperatur wurde die Wandoberfläche im Sockelbereich belegt.

„Coanda-Effekt“

Mit einer Sockelwandheizung gelten für die raumseitigen Oberflächen besondere Randbedingungen. Da der Raum direkt von der Wand beheizt wird (nicht durch die Luft), rechnet man ohne den sonst üblichen Wärmeübergangswiderstand R_{si} . Für die freie Wandfläche kann man von einer durch den Luftauftrieb erzeugten gleichmäßigen Temperatur von 20 °C ausgehen (nach Großschmidt¹⁰⁴ gelegentlich als „Coanda-Effekt“ bezeichnet; Camuffo (1991)¹⁰⁵ hat sich mit diesen wandnahen Auftriebsströmungen befasst und behauptet, dass bereits kleine Temperaturunterschiede zur Raumluft von 0,1 bis 1,0 Kelvin diese wandnahe Grenzschicht deutlich beeinflussen).

Abb. 111 zeigt die Ergebnisse für zwei Varianten:

104 Großschmidt, Henning (2004): Das temperierte Haus. Sanierte Architektur – Behagliche Räume – „Großvitrine“. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLFD). Wien (Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, 9).

105 Camuffo, D. (1991): Wall Temperature and the Soiling of Murals. In: Museum Management and Curatorship (10), S. 373ff.

In Variante 1 (Struktur D) ist die Innendämmung nur im Sockelbereich über ca. 24 cm unterbrochen. Dadurch kann eine deutliche Anhebung der Balkenkopf-Temperatur am Ort T2 (mit Temperaturen von ca. 0 °C (im Vergleich zu fast 8 °C an der Stelle T1) nicht sicher erreicht werden.

Als Alternative wurde bei Variante 2 (Struktur E) die Innendämmung auch im Deckenbereich des darunterliegenden Geschosses über ca. 20 cm geöffnet. Dies führt zwar zum gewünschten Effekt, die Temperatur am Ort T2 liegt nun bei knapp 3 °C, ähnlich der Bestandssituation ohne Dämmung.

Schimmelpilzprobleme sind mit Sockelheizung deutlich weniger wahrscheinlich, weil sich auch bei geöffneter Dämmung unterhalb der Geschosdecke ein Stau der warmen Luft einstellt, der die Wand gleichmäßig temperiert.

Mit Blick auf andere Studien^{106, 107, 108} kann das Risiko für den Balkenkopf bei einem offenen, nicht dampfdicht ausgeführten Dämmungsanschluss als moderat betrachtet werden, sofern die Balkenkopf-Temperaturen den Wert für den unsanierten Zustand nicht unterschreiten.

Um die Sicherheit der Balkenköpfe mit Innendämmung noch detaillierter zu überprüfen, werden im nächsten Abschnitt hygrothermische Jahressimulationen diskutiert. Diese berücksichtigen den diffusiven und kapillaren Feuchtetransport in den Bauteilen und erlauben eine differenziertere Beurteilung der Feuchtrisiken als eine rein thermische Betrachtung.

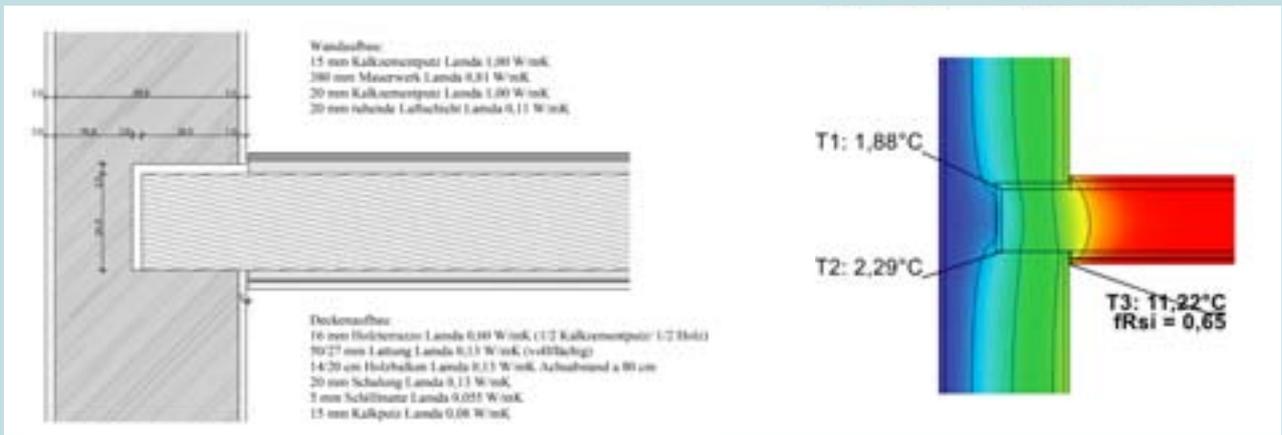
Abschließende Wärmeschutzbewertung der Varianten

Die zusätzlichen Wärmeverluste durch die Wärmebrücke, welche zunächst durch die einbindende Holzbalkendecke entsteht, aber auch durch die partiell geöffnete Innendämmung, kann durch einen Wärmebrückenkoeffizienten ψ beschrieben werden. Dieser charakterisiert den zusätzlichen Wärmestrom durch ein Bauteil, das durch eine Wärmebrücke „gestört“ ist. Bezeichnet man den U-Wert des ungestörten Regelbauteils mit U_0 , so ergibt sich für ein gestörtes Bauteil

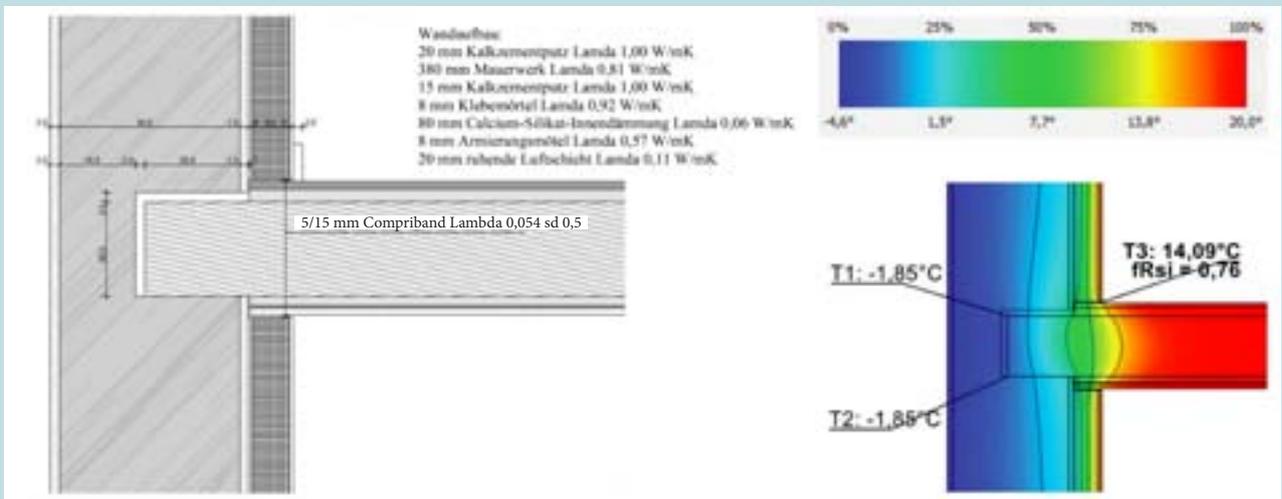
106 Ruisinger, Ulrich (2011): Risikofaktor Balkenkopf? Holzbalkendecken und die Innendämmung. In: Holzbau (1); ISSN 1612-104X (1), S. 18–22.

107 Kehl, Daniel (2012): Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse. In: Holzbau Quadriga (6), S. 40–44.

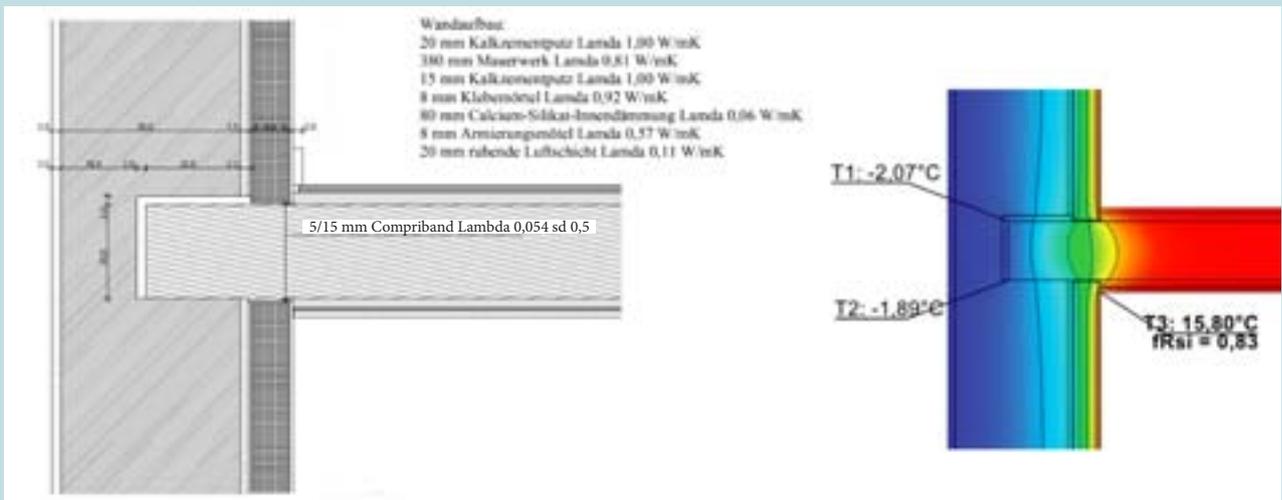
108 Krus, Martin; Silberhorn, Oswald; Kilian, Ralf; Kratzmeier, Matthias (2013): Innovative Innendämmung im Denkmalschutz. Energetische Sanierung des Augsburger Landesamts für Finanzen – Simulation und messtechnische Begleitung. In: Bausubstanz (1), S. 24–33.



a) Wand- und Holzdeckenaufbau im Bestand (ohne Sanierung) – Struktur A



b) Wand- und Holzdeckenaufbau mit 8 cm Calciumsilikat-Innendämmung – Struktur B



c) Wand- und Holzdeckenaufbau mit 8 cm Calciumsilikat-Innendämmung, Dämmung bis zum Holzbalken herangeführt – Struktur C

Abb. 110 Thermische Berechnungen für den Anschluss der Holzbalkendecke an der Außenwand
 Quelle: Gering, Stefan (2014)

bei einer in der Fläche A über die Strecke L laufenden linearen Wärmebrücke der gemittelte U-Wert

$$U_{av} = U_0 + \psi L/A .$$

ψ in der Einheit W/(m·K) gibt den zusätzlichen Wärmeverlust (in W/K) je laufenden Meter der Wärmebrücke an. Bei einer Lufttemperaturdifferenz $\Theta_i - \Theta_e$ hat dieser Wärmeverlust den Wert $\psi(\Theta_i - \Theta_e)L$. Der Koeffizient kann auch negativ sein, was bedeutet, dass die Störung im Bauteil zu einem geringeren Wärmeverlust führt. Die Störung wirkt in diesem Fall als Hindernis für den Wärmestrom. Das ist gerade auch bei der Holzbalkendecke im Bestand und bei kleinen Dämmstärken der Fall.

Graupensberger (2014)¹⁰⁹ hat den Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken und Ausführungsvarianten auf den Wärmebrückenkoeffizienten und den mittleren U-Wert untersucht. Daraus ergibt sich trotz der Öffnung der Innendämmung im Balkenkopfbereich eine Verbesserung des U-Werts von etwa 1,5 W/(m²·K) im Bestand auf ca. 0,75 W/(m²·K) mit 8 cm Innendämmung (ca. 50 % Reduktion, vgl. Tab. 21). Bei genauer Betrachtung erkennt man, dass die Öffnung der Innendämmung im Bereich der Sockelheizung (und unter Berücksichtigung der dort höheren Oberflächentemperatur) knapp 30 % höhere Wärmeverluste bewirkt. Eine Öffnung der Dämmung unterhalb der Decke führt zu mehr als 50 % höheren Verlusten.

Kritische Betrachtung der berechneten Transmissionswärmeverluste bei geöffneter Innendämmung

Die hier gezeigten Berechnungen berücksichtigen nicht den Effekt einer möglicherweise deutlich geringeren Mauerwerksfeuchte durch höhere Wandtemperaturen. Die damit verbundene Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmaterials kann die tatsächlichen Transmissionsverluste signifikant verringern. Dieser Effekt ist im Vergleich zwischen geöffneter und vollflächiger Innendämmung nicht einbezogen.

Eine Studie des Instituts für Wirtschaftsforschung Halle (IWH)¹¹⁰ beziffert auf der Basis von Verbrauchswerten für 2,6 Millionen Wohnungen in rund 257.000 Mehrfamilienhäusern einen durchschnittlichen Energieverbrauch in Deutschland von jährlich 138 kWh/m². Die Werte der IWH variieren je nach Region zwischen

¹⁰⁹ Graupensberger, Mario (2014): Untersuchung eines Sockelheizungssystems bei der energetischen Sanierung von Altbauten. Bachelorarbeit. OTH Regensburg

¹¹⁰ Michelsen, Claus; Müller-Michelsen, Silke (2010): Energieeffizienz im Altbau: Werden die Sanierungspotenziale überschätzt? Ergebnisse auf Grundlage des ista-IWH-Energieeffizienzindex. (Studie IWH Halle). In: Wirtschaft im Wandel (9), S. 447–455.

101 kWh und 172 kWh. Dagegen schätzt Kleemann (2004)¹¹¹ den Energiebedarf von Mehrfamilienhäusern der Nachkriegszeit noch auf rund 260 kWh/m². Für die überraschend niedrigeren Werte sind die zu erwartenden Einsparungen bei nachträglicher Dämmung entsprechend vorsichtiger anzusetzen. So variiert die prozentuale Einsparung nach einer Sanierung bei Gebäuden der 1960er-Jahre zwischen 20 % (kleine Mehrfamilienhäuser) und 40 % (große Mehrfamilienhäuser). Für ältere Gebäude (Baualtersklasse bis 1918) liegen die ermittelten Einsparpotenziale nur zwischen 10 % und 15%. Dies widerspricht der häufig verbreiteten Aussage, dass im Altbaubestand durchschnittliche Einsparungen von rund 50 % erreicht werden können. Die Autoren schließen, dass die Sanierungskostenfunktionen für Gebäude aus verschiedenen Epochen unterschiedlich sind und sich dies auf das betriebswirtschaftlich optimale Sanierungsniveau auswirkt.

Insofern sind die hier betrachteten Innendämmkonzepte nur teilweise dem Ziel, die Transmissionsverluste zu verringern, verpflichtet, sondern sollen vor allem eine Verbesserung der Wohnbehaglichkeit und Wohnhygiene sicherstellen.

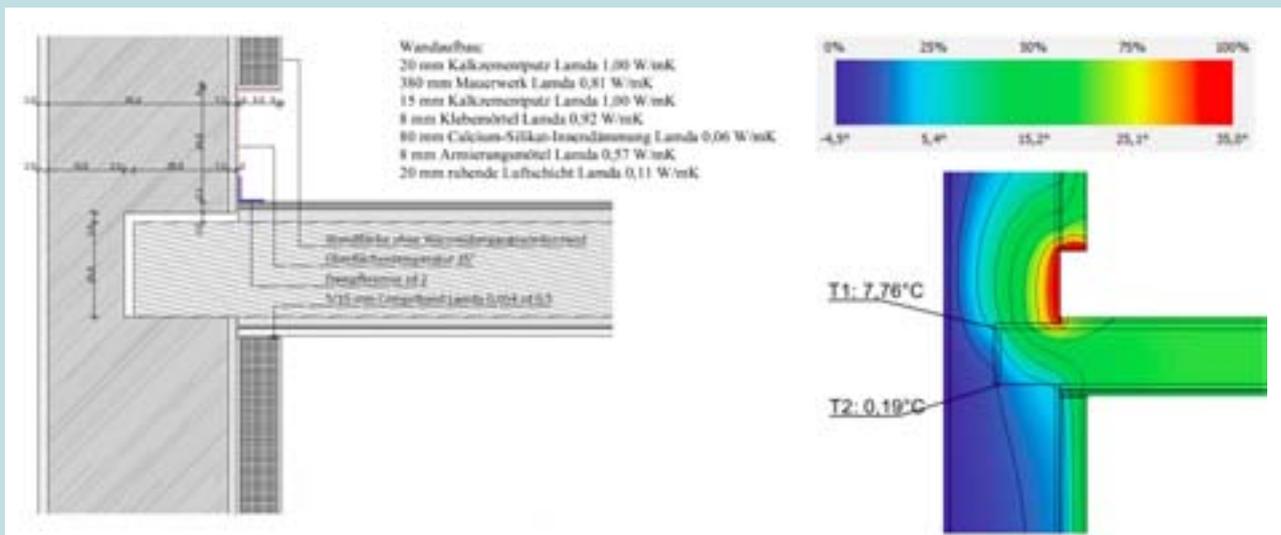
3.4 Hygrothermische Simulationen

Die bisher dargestellten thermischen Berechnungen liefern nur Aussagen für einen stationären Zustand. Um Ergebnisse zu erhalten, die auch instationäre Vorgänge wie Erwärmung, Abkühlung, Wasseraufnahme und Trocknung beinhalten sowie den Feuchtetransport, muss das hygrothermische Verhalten des Systems über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Da thermische und hygrische Eigenschaften eines Baustoffs voneinander abhängen, werden diese gekoppelt in der hygrothermischen Simulation untersucht.

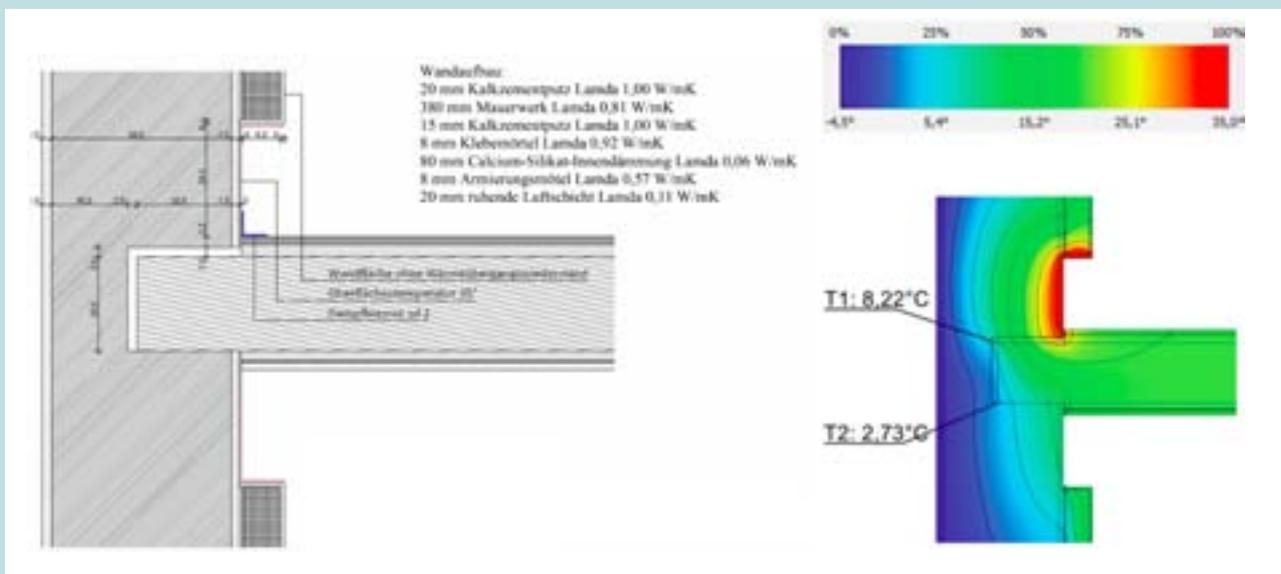
Zur Beurteilung des Feuchteschutzes einer Konstruktion bedient man sich üblicherweise des Glaser-Verfahrens nach DIN 4108 (siehe 3.2). Allerdings werden dort die Kapillarität und die Sorptionsfähigkeit eines Bauteils nicht berücksichtigt. Schließlich arbeitet das Verfahren nur mit stationären Randbedingungen und kann weder Strahlungs- noch Schlagregeneinflüsse berücksichtigen.

Für komplexere Simulationen, die auch den Kapillarwassertransport beinhalten, eignet sich die am

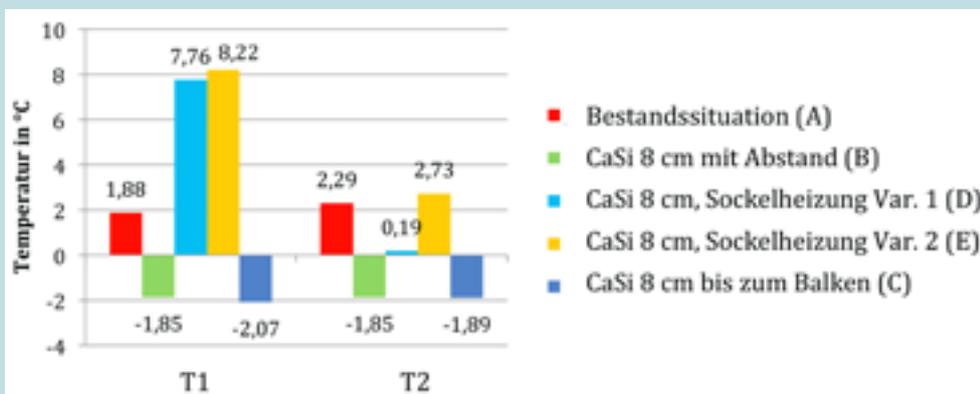
¹¹¹ Kleemann, M. (20) The Residential Building Sector – Potentials and Constraints of CO₂ Mitigation, In: Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik (2004), Bd. 32, S. 115-131.



a) Wand- und Holzdeckenaufbau mit Sockelheizung und unterbrochener Innendämmung (Variante 1) – Struktur D



b) Wand- und Holzdeckenaufbau mit Sockelheizung und beidseitiger Unterbrechung der Innendämmung (Variante 2) – Struktur E



c) Vergleich der Temperatur am Balkenkopf (Position T1 und T2) für verschiedene Konstruktionsvarianten (A bis E)

Abb. 111 Thermische Berechnungen für den Anschluss der Holzbalkendecke an der Außenwand
 Quelle: Gering, Stefan (2014)

Variante	U_0 [W/m ² K]	Ψ [W/m·K]	U_{av} [W/m ² K]
Schnitt durch den Balken			
Bestandssituation (ohne Dämmung)	1,429	-0,022	1,421
CaSi 3 cm		-0,135	1,043
CaSi 3 cm Sockelheizung	1,088	-0,135	1,043
CaSi 8 cm		0,026	0,480
CaSi 8 cm Sockelheizung		0,405	0,606
CaSi 8 cm Sockelheizung, Innendämmung geöffnet unter Decke	0,471	0,766	0,726
Schnitt zwischen den Balken			
Bestandssituation (ohne Dämmung)	1,494	-0,114	1,457
CaSi 3 cm		-0,061	1,067
CaSi 3 cm Sockelheizung	1,088	-0,061	1,067
CaSi 8 cm		0,061	0,491
CaSi 8 cm Sockelheizung		0,490	0,634
CaSi 8 cm Sockelheizung, Innendämmung geöffnet unter Decke	0,471	0,866	0,760

Tab. 21 U_0 -Werte, Wärmebrückenkoeffizienten und mittlere U_{av} -Werte für verschiedene Varianten der Innendämmung (Dämmstärke 3 bzw. 8 cm; Sockelheizung mit/ohne Öffnung der Innendämmung unterhalb der Decke). Die thermischen Berechnungen wurden für einen Schnitt durch den Balken (wie in Abb. 110 gezeigt) und für einen Schnitt zwischen den Balken durchgeführt.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Fraunhofer IBP) entwickelte Software WUFI®2D.¹¹² Zur Berechnung werden natürliche Klimabedingungen herangezogen, wodurch realistisches Bauteilverhalten unter Witterungseinflüssen untersucht werden kann.

3.4.1 Sockelheizung mit Innendämmung

Von Gering (2014)¹¹³ wurde dieses Berechnungstool eingesetzt, um die Auswirkungen möglicher Sanierungsmaßnahmen für das Plato-Wild-Ensemble in Bezug auf Tauwassergefahr und Feuchtegehalt von Holzbalkenköpfen zu bewerten. Unter Berücksichtigung der wichtigsten Einflussfaktoren kann auf diese Weise eine optimale Detailausbildung in der Sanierung entwickelt werden. Dabei beruht ein Konzept auf der bereits thermisch untersuchten Sockelheizung („Konvektor“).

Randbedingungen

Für das Außenklima werden die meteorologischen Wetterdaten der Stadt München herangezogen (Abb. 112 links oben). Das Innenraumklima ist nach WTA-

¹¹² Künzel, Hartwig (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart. Internet (IBP): <http://www.wufi.de>.

¹¹³ Gering, Stefan (2014): Thermische Detailsimulationen in der Bestandssanierung. Bachelorarbeit. OTH Regensburg.

Merkblatt 6-2-01¹¹⁴ der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) mit normaler Feuchtelast definiert. Der Temperaturverlauf schwankt nach der Funktion einer Sinuskurve mit einer Amplitude von 1 °C, wobei das Maximum von 22 °C am 3. Juni eines Jahres erreicht wird. Bei der Luftfeuchtigkeit geht man von 50 % relativer Feuchte aus, die ebenfalls als Sinuskurve mit einer Amplitude von 10 % dargestellt wird. Das Maximum stellt sich am 16. August ein und beträgt 60 % relative Luftfeuchte (Abb. 112 rechts oben).

Im Heizbereich setzen wir die Wandtemperatur auf einen Wert von 35 °C, was näherungsweise der benötigten Heizleistung für eine Sockelheizung mit 8 cm Innendämmung entspricht (siehe Kapitel G).

Die Heiztemperatur erreicht im Winter ein Maximum von 35 °C und sinkt im Sommer auf 22 °C ab (näherungsweise wieder als Sinuskurve mit einer Amplitude von 6,5 K um den Mittelwert 28,5 °C modelliert). Die relative Feuchte im Bereich der Sockelheizung steigt mit Abnahme der Heiztemperatur und schwankt mit einer Amplitude von 20 % zwischen 57 % sowie 17 % relativer Luftfeuchte (Abb. 112 rechts unten). Letztere wird aus der durch die WTA-Randbedingungen vorgegebenen Raumluftfeuchte ermittelt: Bei gleichem Wasserdampf-Partialdruck verhalten sich die relativen Feuchten an verschiedenen Orten im Raum umgekehrt proportional wie die temperaturabhängigen Sättigungsdampfdrücke. Somit kann für jeden einzelnen Tag über ein Jahr verteilt die Temperatur und relative Feuchte am Konvektor berechnet werden. Diese Daten werden in WUFI als Randbedingung für den Heizbereich eingegeben.

Die Materialdaten für die hygrothermischen Berechnungen sind in Abb. 113 zusammengefasst. Die Kenndaten beinhalten neben der freien Wassersättigung (Wassergehalt bei 100 % Oberflächenfeuchte) insbesondere die Koeffizienten, die beschreiben, wie sich die Wärmeleitfähigkeit des Materials mit wachsendem Feuchtegehalt und mit der Temperatur in Masseprozent (M.-%) verändert. In WUFI sind diese Parameter Bestimmungsgrößen für Modellkurven, die das Verhalten der Bauteile und veränderlichen Feuchte- und Temperaturbedingungen beschreiben.

Kritische Holzfeuchte

Für den Schimmelpilzbefall muss die relative Luft-

¹¹⁴ Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse (2006). Endgültige Fassung: Mai 2002. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (WTA-Merkblatt, 6-2-01/D).

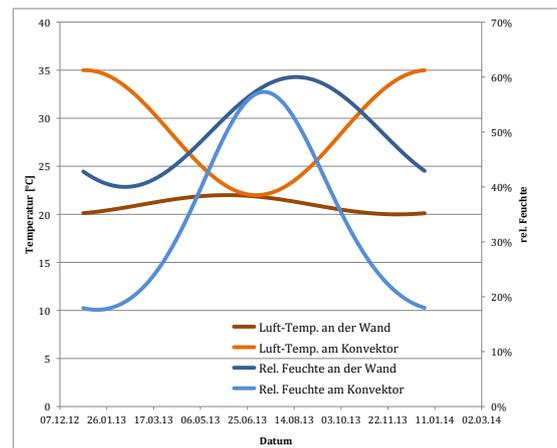
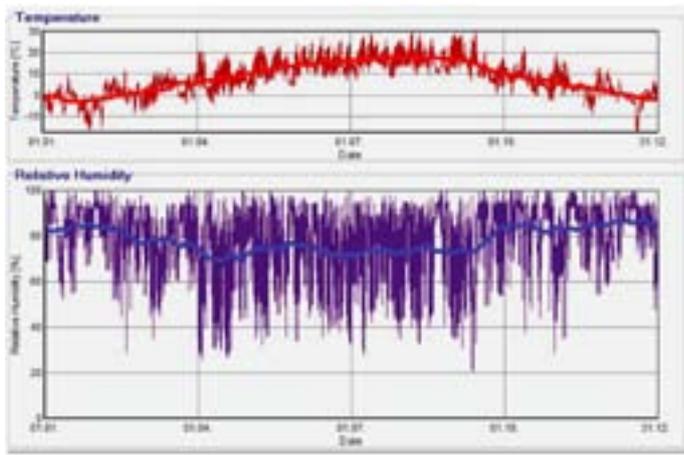


Abb. 112 Außenklima nach WTA-Merkblatt 6-2-01 (links) und Standard-Innenklima (hier Wandtemperatur und Oberflächenfeuchte; rechts oben); Modell für die Oberflächentemperatur und -feuchte im Sockelheizungs Bereich (Konvektor; rechts unten)

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [m ³ /m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]	Diffusionswiderstandszahl [-]	Bezugsfeuchte [kg/m ²]	freie Wassersättigung [kg/m ³]	Feuchte-Koeff. Wärmeleitf. [%/M·%]	Temp.-Koeff. Wärmeleitf. [W/m·K ²]	Einbaufeuchte [kg/m ³]
Kalkzementputz (innen und außen)	1800	0,240	1,000	850	19	45	210	8	0,0002	210
Mauerwerk	1820	0,310	0,810	850	15	4,5	230	15	0,0002	100
Holzterrazzo (Kalkzement/Holz)	1150	0,490	0,570	1175	12	72	290	4,7	0,0002	154
Lattung (Holz)	500	0,730	0,130	1500	4,3	98	370	1,3	0,0002	98
Holzbalken	500	0,730	0,130	1500	4,3	98	370	1,3	0,0002	98
Schalung (Holz)	500	0,730	0,130	1500	4,3	98	370	1,3	0,0002	98
Schilfmatte	70	0,950	0,055	2500	1,5	-	-	1	0,0002	12
Mineralschaum	90	0,900	0,042	1300	2	1,16	66	-	0,0001	1,16
Calciumsilikat	270	0,900	0,055	920	3,23	4,76	850	-	0,0002	4,76
Kalkputz	1800	0,300	0,080	850	7	30	250	8	0,0002	250
Luftsichten	1,3	0,990	0,110	1000	0,56	-	-	-	-	-
Klebemörtel (MiSa)	1400	0,500	0,440	100	38	44;54	163	-	0,0002	163
Klebemörtel (CaSi)	1400	0,500	0,920	100	38	44,54	163	-	0,002	163
Hanf-Filz	170	0,800	0,047	2300	1	-	-	-	-	-
Compriband (PU)	40	0,950	0,054	1500	0,5	-	-	-	0,0002	0
Armierungsmörtel (MiSa)	1500	0,500	0,930	850	10	45	210	8	0,0002	210
Armierungsmörtel (CaSi)	1500	0,500	0,570	850	10	45	210	8	0,0002	210
Dampfbremse (s _d = 2 m)	130	0,001	2,300	2300	2000	-	-	-	0,0002	0
Innenfarbe	1100	0,120	0,700	850	40	2,9	120	8	0,0002	120
Außenfarbe	1100	0,120	0,700	850	50	2,9	100	8	0,002	100

Abb. 113 Wärme- und Feuchtekenndaten für die verwendeten Materialien in der hygrothermischen Simulation (Gering, 2014)

feuchte auf Bauteiloberflächen über einen längeren Zeitraum (über ca. vier Wochen) mindestens 80% betragen, bevor es zu Schimmelpilzbildung kommt. Aber auch im Inneren einer Konstruktion können ungünstige Feuchtebedingungen die Bausubstanz schädigen. Manche holzerstörende Pilze werden erst ab einer bestimmten Temperatur aktiv. Übersteigt der Wassergehalt 20 M.-% über einen längeren Zeitraum, können sich holzerstörende Pilze entfalten und die Holzkonstruktion gefährden. Allerdings ist der Wassergehalt nicht das einzige Kriterium. Laut Kehl (2012)¹¹⁵ kommt es auf die Kombination von Temperatur und relativer Luftfeuchte an. Abb. 114 zeigt nach Kehl die Grenzkurve für den Holzabbau in Abhängigkeit von Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Diese Kurve lässt sich über die Sorptionsisotherme auf die Holzfeuchte übertragen. Die Sorptionsisotherme gibt die Ausgleichsfeuchte bei einer vorherrschenden Oberflä-

chenluftfeuchte und Temperatur an.

Situation im Bestand

Ausgehend von typischen Baustofffeuchten muss die numerische Simulation über einen längeren Zeitraum ablaufen, bevor sich zeitlich periodische Feuchtegehaltskurven einstellen. Dies entspricht der auch in der Praxis beobachteten Austrocknungszeit eines zunächst feuchten Mauerwerks, wobei die in der Simulation angesetzten Ausgangswerte hier keine praktische Bedeutung haben.

Es wurde eine Simulationsdauer von elf Jahren gewählt, von welcher nur das letzte Jahr (vom 1. Januar 2024 bis 1. Januar 2025) betrachtet wurde. Damit ist sichergestellt, dass sich der Feuchtegehalt in der Konstruktion eingependelt hat. Abb. 115 illustriert diesen Trocknungsverlauf.

¹¹⁵ Kehl, Daniel (2012): Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse. In: Holzbau Quadriga (6), S. 40–44.

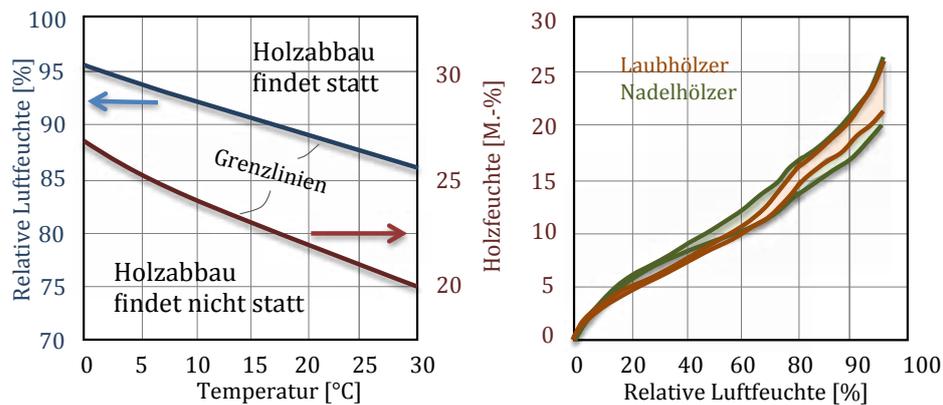


Abb. 114 Links: Kritische Luftfeuchte und Holzfeuchte für Schimmelpilzbildung und Fäulnis nach Kehl (2012). Rechts: Gleichgewichts-Feuchtegehalt von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Umgebungsluftfeuchte (Sorptionsisotherme) für Laub- und Nadelhölzer (Quelle: Kießl, Kurt; Möller, U. (1989): Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 47).

Abb. 116 a zeigt den zeitlichen Verlauf von Temperatur, Baustofffeuchtegehalt (in M.-%) und relativer Luftfeuchte an vier Vergleichspositionen im Holzbalken.

Die kritischen Positionen 1 und 2 weisen nahezu identische Temperaturen (T1 und T2) auf; im Winter liegen diese bei ca. -2°C , im Sommer bei bis zu 25°C .

Der Feuchtegehalt schwankt zwischen 17% und 22% (T1) bzw. 16% und 18%. Der Unterschied erklärt sich aus der Umgebung der beiden Punkte: Position 1 liegt an der Balkenoberkante und ist von Luft umgeben, während Punkt 2 an der Unterkante direkt ans Mauerwerk angrenzt. Dadurch wird die relative Feuchte und die Baustofffeuchte an Position 2 vom Mauerwerk gepuffert; die Amplituden um das ganzjährige Mittel von ca. 17% sind hier nur etwa halb so groß wie am Punkt 1. Dies begründet auch die Beobachtung, dass der maximale Wassergehalt an Position 1 bereits im Hochwinter auftritt (schnellere Reaktion auf die veränderten Umgebungsbedingungen), während Position 2 diesen erst etwas später im Jahr erreicht.

Der Temperaturverlauf am Balkenkopf wird von den äußerlichen Wetterbedingungen beeinflusst und ähnelt dem in der Simulation verwendeten Münchener

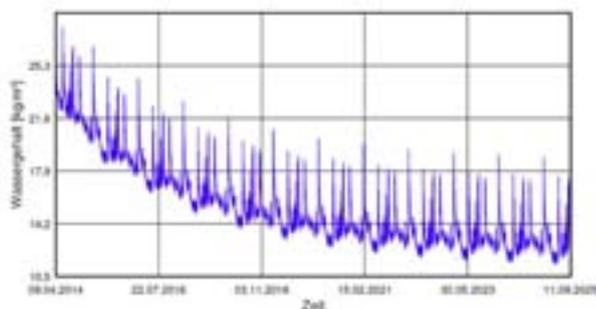


Abb. 115 Mittlerer Wassergehalt (in kg/m^3) der Wandkonstruktion im unsanierten Bestand im Verlauf der Simulation
Quelle: Gering (2014)

Wetterprofil. Höhere Temperaturen im Sommer bewirken eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit der Luft, wodurch die relative Feuchte bei gleichbleibender Wassermenge in der Luft sinkt.

Die Punkte 3 und 4 (Abb. 116 b) liegen in der Konstruktion sehr nah am Rauminnern und weisen kleinere Amplituden im Verlauf der Temperatur, der relativen Feuchte und des örtlichen Wassergehalts auf. An Position 4 sind die klimatischen Änderungen kaum mehr erkennbar, da im Rauminnern nahezu konstante Klimabedingungen herrschen.

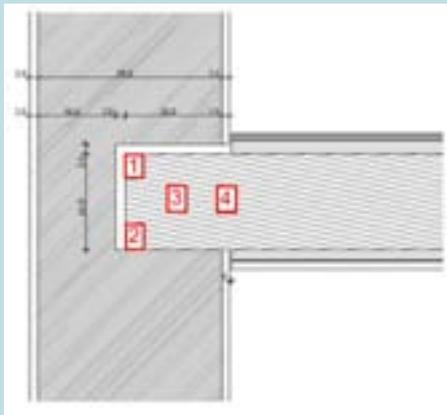
Die Werte für die kritische Position 1 liegen über einen längeren Zeitraum über 80% relativer Feuchte und 20% Wassergehalt. Im selben Zeitraum nimmt die Temperatur Werte zwischen -2°C und 17°C an. Nach Kehl (2012)¹¹⁶ (siehe Abb. 114) würde diese Situation bereits zu einem Holzabbau am Balkenkopf führen. Die Bestandsanalyse (soweit örtlich zugänglich) zeigt jedoch typische Feuchtegehaltswerte unter 15% auf. Somit scheinen die Werte für den Wassergehalt zu hoch zu sein.

Einfluss des Außenanstrichs

Ursache für den hohen Wassergehalt in der Simulation kann das Fehlen einer außenseitigen hydrophoben Oberflächenbeschichtung (Farbanstrich) sein. Durch Schlagregen, der in der Simulation berücksichtigt wird, kommt es zu einer starken Wasseraufnahme.

Daher wird nun in der Simulation ein außenseitiger 1 mm dicker wasserabweisender Farbanstrich hinzugefügt. Damit geht der Wassergehalt an Position 1 um ca. 7 Prozentpunkte zurück. Ein innenseitiger Farbanstrich hat dagegen keine nennenswerte Auswirkung auf das Ergebnis. Somit lässt sich festhalten, dass die hohe Feuchtebelastung von außen kommen muss.

¹¹⁶ Kehl, Daniel (2012): Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse. In: Holzbau Quadriga (6), S. 40–44.



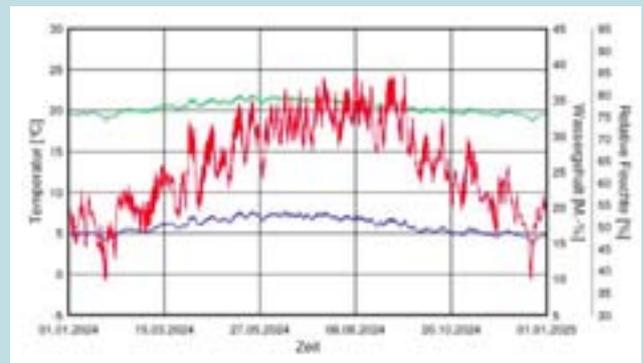
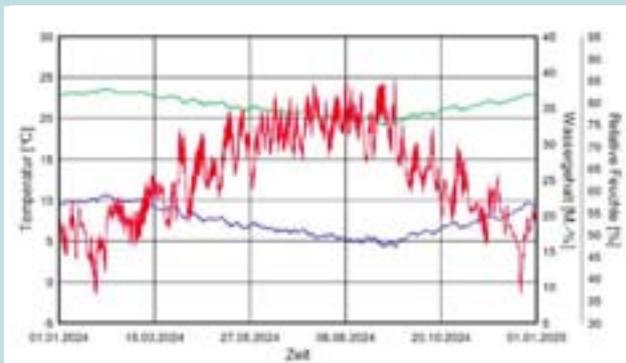
Hygrothermische Simulation für die Bestandssituation
(Südseite)

Einfluss des Außenanstrichs auf den Feuchteintrag ins Mauerwerk

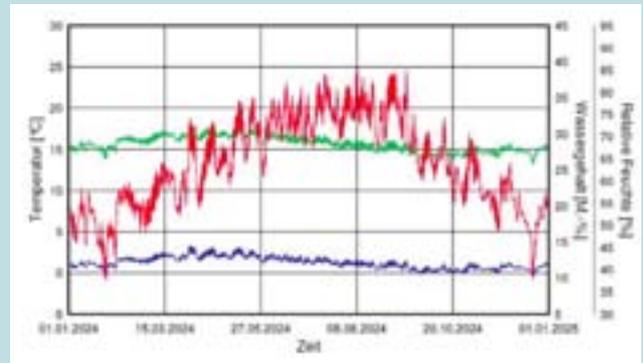
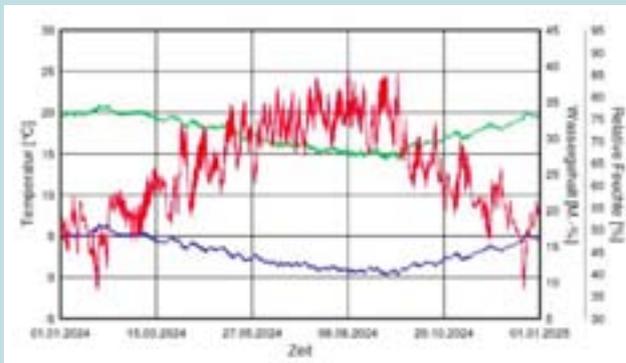
Relative Luftfeuchte (in %)

Temperatur (in °C)

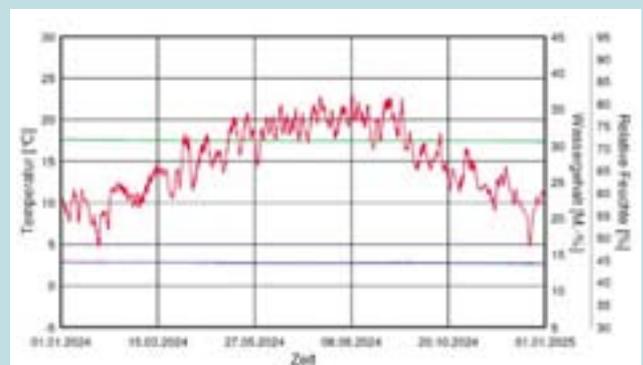
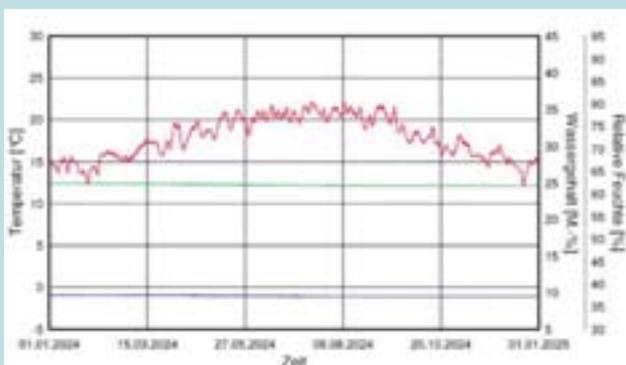
Wassergehalt (in M.-%)



a) Position 1 und 2 an Südseite, ohne Außenfarbe



b) Position 1 und 2 an Südseite, mit Außenfarbe



c) Position 3 und 4 an Südseite

Abb. 116 Zeitlicher Verlauf von Temperatur, örtlichem Baustoffwassergehalt und relativer Luftfeuchte an vier Vergleichsstellen im Holzbalken für die Witterungseinflüsse an einer Südfassade
Quelle: Gering, Stefan (2014)

D

Mit Farbanstrich wird der kritische Wassergehalt von 20 % nicht erreicht, weshalb auch kein Schadensrisiko besteht.

In den folgenden Untersuchungen wurde stets mit einem beidseitigen Farbanstrich gerechnet.

Einfluss der Himmelsrichtung

Die Feuchtelasten auf die Fassade sind je nach Himmelsrichtung unterschiedlich. Wir verdeutlichen diesen Effekt am Beispiel der Struktur D (geöffnete Innendämmung mit Sockelheizung).

In Abb. 117 ist der Verlauf von Temperatur, relativer Feuchte und Wassergehalt am kritischen Punkt 2 für die vier Himmelsrichtungen dargestellt. Die Temperatur schwankt in allen Fällen zwischen -5°C und 24°C . Durch die Innendämmung kühlen die Balkenköpfe etwas stärker ab. (Zum Vergleich: Im unsanierten Zustand beträgt die tiefste Temperatur etwa -2°C .)

Süd- und Ostseite zeigen sehr ähnliche Ergebnisse. Das selbe gilt für Nord- und Westseite im Vergleich.

An der Südseite fällt der Wassergehalt höher aus als in der Ausgangssituation. Bei der Nord- und Westausrichtung werden an Position 2 Werte von ca. 24 % erreicht. Auf der Nord- und Westseite herrschen ähnliche Bedingungen, was Schlagregen und Windbedingungen anbelangt. Da die Nordseite nur diffuse Sonnenstrahlung empfängt und dadurch der Trocknungsprozess gebremst wird, ist diese Ausrichtung als die ungünstigste anzusehen.

Infolgedessen werden alle weiteren Simulationen mit Nordausrichtung durchgeführt.

Nach Klärung der äußeren Einflussfaktoren wenden wir uns daher den konstruktiven Detailvarianten zu.

Die Strukturvariante E (Sockelheizung mit unterseitig geöffneter Innendämmung) weist an Position 2 im Winter deutlich höhere Temperaturen auf als Struktur D, ähnlich dem unsanierten Zustand. Entsprechend bleibt der Wassergehalt im Holzbalken stets unter 15 %. An Position 1 (in der Nähe der Sockelheizung) ist die Holzfeuchte sogar niedriger als im Bestand. Die lokale Erwärmung der Wand wirkt sich somit positiv auf den Wassergehalt im Holz aus (Abb. 118).

Die hygrothermische Simulation belegt somit die Schlussfolgerung aus den thermischen Rechnungen, dass Strukturvariante E als optimal gelten kann.

Dies gilt insbesondere deshalb, weil sich in weiteren Simulationen herausgestellt hat, dass die dampfdichte Ausführung des Anschlussdetails in der Fußbodenleiste keinen Einfluss auf die Holzfeuchte hat (Gering 2014).¹¹⁷ Damit entfällt ein Risikofaktor, der durch unsachgemäße bzw. fehlerhaften Einbau der Innendämmung entsteht, wenn ein dampfdichter Anschluss gefordert ist.

Betrachtungen zum Kapillarwassertransport

Um den Unterschied zwischen kapillaraktiven Dämmstoffen und nichtkapillaraktiven zu verdeutlichen, zeigt Abb. 119 einen direkten Vergleich der Holzfeuchte für eine vollflächige Innendämmung (Struktur B) mit Calciumsilikat und Mineralschaum im Vergleich.

Bei der vollflächigen Dämmvariante erhält man deutliche Differenzen zwischen der Calciumsilikat- und der Mineralschaumdämmung. Die Werte für den Wassergehalt und die relative Feuchte liegen bei Mineralschaum teilweise um 6 Prozentpunkte höher als bei Calciumsilikat. Die Holzfeuchte beträgt bei vollflächiger Mineralschaumdämmung im Jahresverlauf an Position 1 bis zu 27 %, auch an Position 2 werden Werte bis 24 % erreicht.

Eine kapillaraktive Innendämmung stellt also eine essenzielle Verbesserung der Feuchtesituation dar.

Neben der Kapillaraktivität und dem hohen pH-Wert (schimmelpilzbekämpfendes alkalisches Milieu) hat Calciumsilikat als Innendämmmaterial den Vorteil, nicht brennbar zu sein (Baustoffklasse A1).

3.4.2 Weitere hygrothermische Detailberechnungen

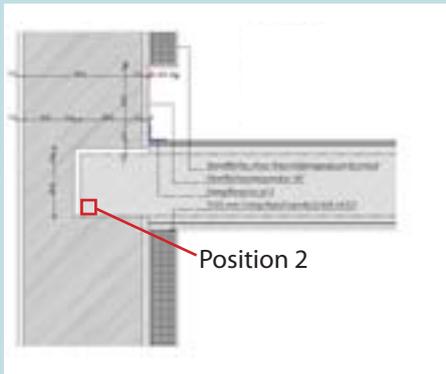
Für die bereits in Abschnitt 2.3 behandelten Konstruktionsdetails wurden von Höflich (2013)¹¹⁸ ebenfalls hygrothermische Simulationen durchgeführt.

Außenwand mit einbindender Innenwand

Wir betrachten die Temperatur und relative Luftfeuchte im Bereich der Wandkante und in einem ungestörten Bereich der Außenwand.

¹¹⁷ Gering, Stefan (2014): Thermische Detailsimulationen in der Bestandssanierung. Bachelorarbeit. OTH Regensburg.

¹¹⁸ Höflich, Daniel (2013): Thermische Berechnungen und hygrothermische Detail-Simulationen für eine Gebäudemodernisierung mit kapillaraktiver Innendämmung. Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.



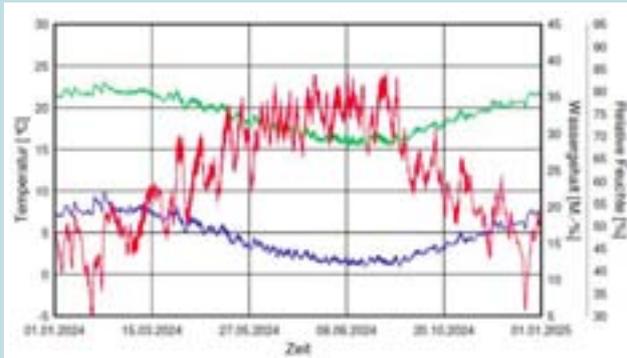
Hygrothermische Simulation für die Struktur D (Sockelheizung)

Einfluss der Himmelsrichtung auf den Feuchteeintrag ins Mauerwerk

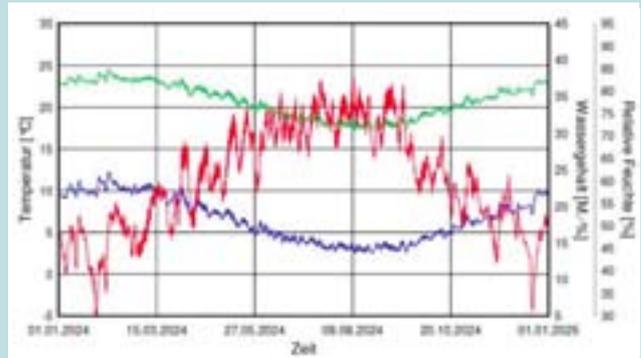
Relative Luftfeuchte (in %)

Temperatur (in °C)

Wassergehalt (in M.-%)

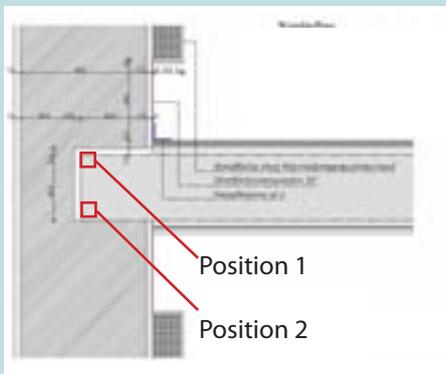


a) Süd/Ost



b) Nord/West

Abb. 117 Zeitlicher Verlauf von Temperatur, örtlichem Baustoffwassergehalt und relativer Luftfeuchte an der kritischen Balkenkopf-Position 2 für die vier Himmelsrichtungen in Strukturvariante D (Sockelheizung)



Hygrothermische Simulation für die Struktur E (Nordfassade)

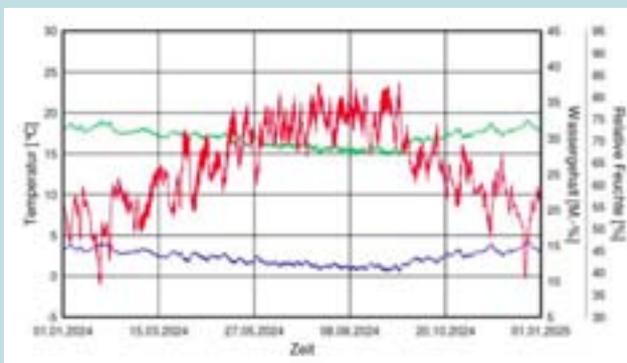
Sockelheizung

Einfluss der Öffnung der Innendämmung unterhalb der Balkendecke

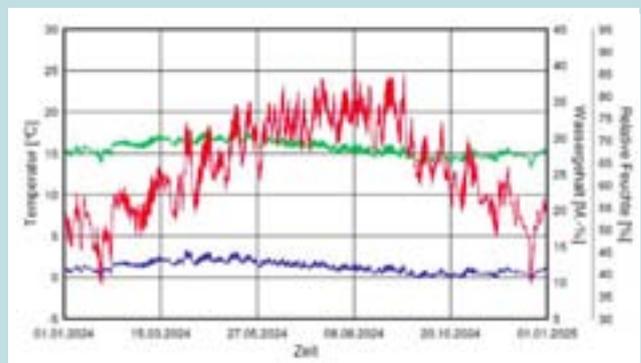
Relative Luftfeuchte (in %)

Temperatur (in °C)

Wassergehalt (in M.-%)



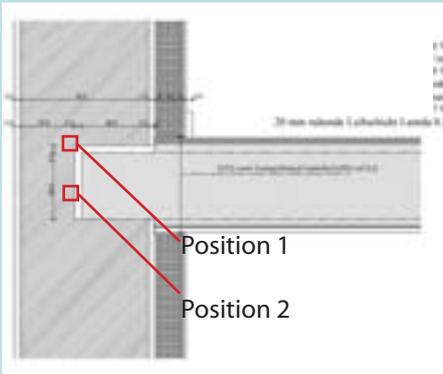
a) Position 1



b) Position 2

Abb. 118 Zeitlicher Verlauf von Temperatur, örtlichem Baustoffwassergehalt und relativer Luftfeuchte an den Positionen 1 und 2 für die Strukturvariante E (Sockelheizung mit unterseitiger Öffnung der Dämmung)
Quelle: Gering, Stefan (2014)

D



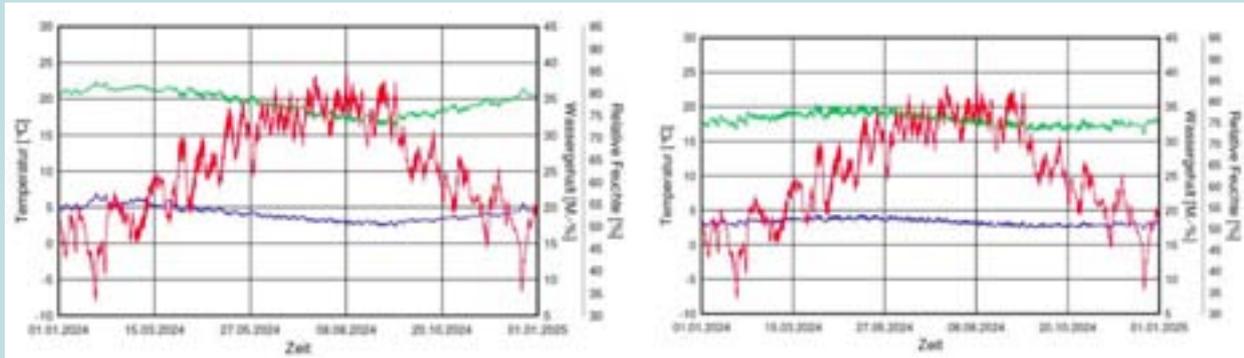
Hygrothermische Simulation für die Struktur B (Nordfassade)

Vollflächige Innendämmung
 Vergleich von Calciumsilikat (kapillaraktiv) mit Mineralschaum

Relative Luftfeuchte (in %)

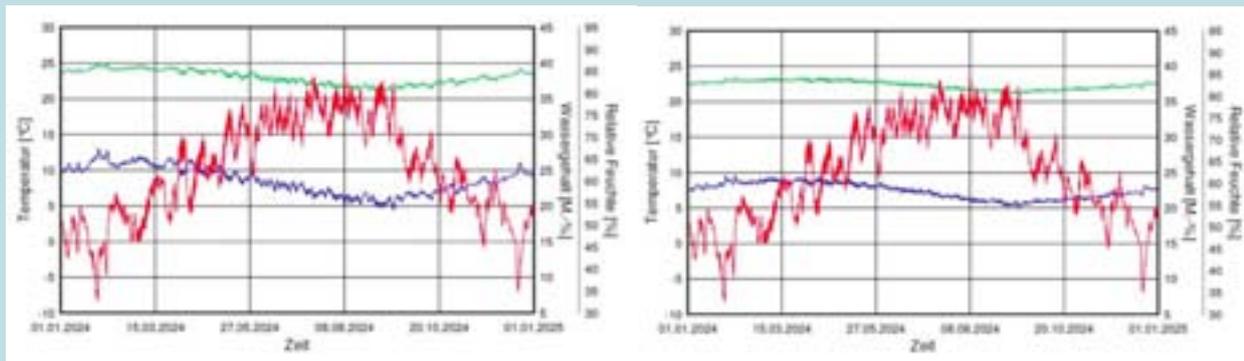
Temperatur (in °C)

Wassergehalt (in M.-%)



a) Calciumsilikat-Dämmung, Position 1

b) Calciumsilikat-Dämmung, Position 2



c) Mineralschaum-Dämmung, Position 1

d) Mineralschaum-Dämmung, Position 2

Abb. 119 Zeitlicher Verlauf von Temperatur, örtlichem Baustoffwassergehalt und relativer Luftfeuchte für verschiedene Dämmstoffvarianten in Strukturvariante B (vollflächige Innendämmung).
 Quelle: Gering, Stefan (2014)

Im unsanierten Zustand erhält man für eine Innenluftfeuchtigkeit von 50% bei 20°C in der Kante aufgrund der dort geringfügig höheren Temperatur (Stoßstelle der Innenwand) eine etwas niedrigere Oberflächenfeuchte als im ungestörten Außenwandbereich mit Werten unter 70%. Die durchgeführten Langzeitmessungen (vgl. Abb. 90) zeigen jedoch, dass die tatsächliche Raumluftfeuchte in der Realität um 60% liegt, mit Spitzenwerten an die 100%, ausgelöst durch Kochaktivitäten und andere Haushaltsvorgänge. Somit kann in der Realität die Oberflächenfeuchte auch längerfristig 80% und mehr erreichen.

Der örtliche Wassergehalt an der raumseitigen Oberfläche liegt zwischen 28 und 35 kg/m³ und unterscheidet sich in Kante und Wandfläche wenig.

Mit einer 8 cm Innendämmung aus Calciumsilikat ändert sich die Situation dramatisch: Der oberflächennahe Feuchtegehalt der Wand sinkt im ungestörten Bereich nahezu auf null, die Dämmung saugt die Feuchtigkeit auf und leitet sie nach innen weiter. Dies führt auch zu einer entsprechend niedrigeren Luftfeuchte im oberflächennahen Bereich (hygroskopische Wirkung). Hinter der Dämmung (vor dem Kleber zur Befestigung der Calciumsilikatplatten) liegt der Wassergehalt zwischen 35 und 55 kg/m³, im Bereich der Kante nur zwischen 35 und 40 kg/m³. Der Unterschied liegt an der

Wärmebrücke durch die einbindende Innenwand. Die relative Feuchte erreicht im Winter Werte bis 90 % (kein Tauwasser!), im Bereich der Wandkante sogar nur 75 %.

Im Winter gelangt die Raumluftfeuchte in die Calciumsilikat-Innendämmung, die viel Feuchte aufnehmen kann, ihr Feuchtegehalt steigt. Der Kleber der Innendämmung stellt einen Diffusionswiderstand dar, im Gegensatz zur diffusionsoffenen Calciumsilikatplatte. Somit wirkt der Kleber als Dampfbremse und verhindert, dass Wasser hinter dem Kleber in der Wand ausfällt. Dies wird begünstigt durch die Verwendung eines Klebers mit hoher Wärmeleitfähigkeit.

Kellerdecke

Der Verlauf der relativen Feuchte bzw. des Wassergehalts in der Bodenkante entspricht der örtlichen Temperatur. In der raumseitigen Bodenkante steigt die rel. Feuchte nur im unsanierten Zustand auf über 80% und bleibt sonst bei ca. 70% für die Varianten mit Dämmung. Hinter der Dämmung liegt die rel. Feuchte bei allen Details der Kellerdecke bei ca. 90%. Hier sind die Bedingungen des Schimmelpilzwachstums gegeben. Tauwasser entsteht jedoch auf der kalten Seite der Dämmung noch nicht. Ein Hinterströmen der Innendämmung mit Raumluft sollte ausgeschlossen werden, damit keine warme, feuchte Raumluft mit Sporen und Nährstoffen hinter die Dämmung gelangen kann.

Oberste Geschossdecke

Sowohl im unsanierten Zustand als auch bei den verschiedenen Dämmvarianten steigt die relative Feuchte in der Deckenkante im Innenputz an der Oberfläche nie über 70%. Damit kann an der Außenwandoberfläche Schimmelpilzwachstum und Tauwasseranfall ausgeschlossen werden.

Hinter der Dämmung liegt die relative Feuchte bei allen Dämmvarianten bei maximal 78% in der Deckenkante in der Kleberschicht. Es entsteht auch hier kein Schimmel bzw. Tauwasser. Allgemein sind eine sorgfältige handwerkliche Ausführung und vollflächige Verklebung der Innendämmung notwendig, damit keine warme Raumluft hinter die Dämmung gelangen kann.

3.5 Alternativen zur Innendämmung

Neben Calciumsilikat als Innendämmung werden für Gebäude mit architektonisch wertvollen, gegliederten Fassaden auch innovative Außendämmsysteme entwi-

ckelt. Hier ist insbesondere die einem klassischen Wärmedämmputz ähnliche, jedoch um ein Vielfaches stärker dämmende Aerogel-Technologie zu nennen. Diese Baustoffe weisen Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,004 bis 0,030 W/(m·K) auf.¹¹⁹

In einer Studienarbeit von Melzl, Puff und Wittmann (2013)¹²⁰ wurden die drei Dämmsysteme im Detail für das Plato-Wild-Ensemble gegenübergestellt. Tab. 22 zeigt einen Vergleich des Aerogel-Dämmputzes mit der gängigen styroporbasierten Außendämmung aus expandiertem und extrudiertem Polystyrol (EPS/XPS) und Calciumsilikat als Innendämmung, basierend auf Informationen der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (Stahl 2012).¹²¹

Ursprünglich wurden Aerogele als Hochtemperatur-Isolationsstoffe in der Weltraumtechnik eingesetzt. Neben den Silica-Aerogelen gibt es noch Aerogele, welche auf Kohlenstoff- oder Kunststoffbasis basieren, sowie die Hybrid-Aerogele. In der Dämmbranche werden jedoch wegen ihrer hoch wärmeisolierenden Eigenschaften die Silica-Aerogele verwendet.¹²² Aerogel-Dämmvliese (Polyester-Glasfaser in Aerogel getränkt) sowie Aerogel-Dämmplatten und Aerogel-Granulat sind schon seit einigen Jahren erhältlich.

Insbesondere bei denkmalgeschützten Gebäuden sollen Fenstergesimse, Rundbögen, Vorsprünge und Fachwerke objektgetreu erhalten bleiben. Genau aus diesen Gründen gewinnen Wärmedämmputze nach Gänßmantel (2013)¹²³ seit einigen Jahren immer mehr an Bedeutung, erlauben sie doch „neben einer rationalen Verarbeitung den hohlraumfreien Verbund mit der Bestandsoberfläche und auch bei dünneren Schichtdicken eine spürbare Verringerung von Transmissionswärmeverlusten.“ Laut EMPA sind Aerogel-Putze „doppelt so gut isolierend“ wie die heute am Markt üblichen

119 Lide, D. R., ed. (2005): CRC Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.). Boca Raton (FL): CRC Press. Section 12, S. 227.

120 Puff, Simone; Melzl, Andreas; Wittmann, Ines (2013): Nachhaltige Dämmkonzepte. Studienarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

121 Stahl, Thomas (2010): Neuer Hochleistungsdämmputz an der Empa entwickelt (MM-Aerogel-Dämmputz). Aerogel-Dämmputz isoliert historische Bauten einfach und wirksam. Hg. v. Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (<http://www.empa.ch>).

122 Radtke, Lorenz (2013): Aerogele & Giessen. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Online verfügbar unter: http://www.dlr.de/mp/desktopdefault.aspx/tabid-1801/2559_read-3939/, zuletzt geprüft am 17.07.2013.

123 Gänßmantel, Jürgen (2013): Es muss nicht immer Platte sein. Marktübersicht Wärmedämmputze. In: Bauen im Bestand B+B (Bauenschutz und Bausanierung) (2), S. 44–55.



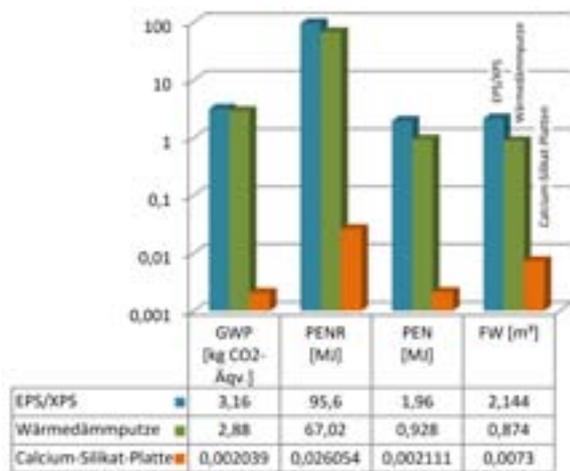


Abb. 120 Vergleich der Ökobilanzdaten der Dämmstoffe (bezogen auf 1 kg Dämmstoff) nach Ökobaudat 2013 (nach Puff, Simone; Melzl, Andreas; Wittmann, Ines, 2013)

Wärmedämmputze.¹²⁴

Aerogel besteht zu 99% aus Luft. Aerogele werden mit verschiedenen energieintensiven Verfahren hergestellt. Die Quelle für den Ausgangsstoff Kieselsäure ist Sand, der beinahe unbegrenzt zur Verfügung steht. Die Herstellung von SiO₂-Aerogelen (Silica-Aerogele) erfolgt im Sol-Gel-Prozess.¹²⁵ Hierbei wird zunächst Tetramethylxosilan in Methanol gelöst. Nach Zugabe von Wasser findet eine Hydrolyse- und Kondensationsreaktion statt. Die Porenflüssigkeit besteht nun hauptsächlich aus dem Lösungsmittel. Nach der Gelierung wird das Material in einem Autoklav bei hoher Temperatur und hohem Druck getrocknet, wobei unter Beibehaltung des Volumens Luftporen mit Durchmessern von ca. 20 Nanometern entstehen.¹²⁶ Luftbewegungen (Konvektion) im Inneren werden dadurch unterbunden. Dies führt zu einem hohen Wärmedämmvermögen und geringer Masse. Mit einer speziellen Putzmaschine aufgetragen, lässt sich der Putz innen und außen anwenden und bis zu einer Dicke von 6 cm oberflächengetreu auftragen. Er ist wasserdampfdurchlässig und wasserabweisend.

Für Aerogel-Dämmstoffe kann noch keine Prognose über die Entsorgung aufgestellt werden. Untersuchun-

¹²⁴ Hartmeier, Severin; Stahl, Thomas (2012): Neuer Dämmputz mit hervorragenden Isolationswerten. Weltraumtechnik für Altbauwände. an der Empa entwickelt (MM-Aerogel-Dämmputz). Hg. v. Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (<http://www.empa.ch>).

¹²⁵ Kistler, Samuel Stephens (1931): Coherent expanded aerogels and jellies. In: Nature. Bd. 127 (1931), S. 741.

¹²⁶ Hüsing, Nicola (1998): Aerogele – Luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften. In: onlinelibrary.wiley.com (Hg.): Angewandte Chemie, Bd. 110, S. 22–47.

gen legen jedoch nahe, dass sich Nanopartikel bei thermischer Behandlung zu Mikro- und Makrostrukturen umwandeln und somit ihre spezifischen toxischen Eigenschaften verlieren. Daher kommt für die Entsorgung mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Hochtemperaturverbrennung infrage. Für Aussagen über die Risiken von Nanoprodukten für den Menschen fehlen noch Langzeiterfahrungen; es kann jedoch bei der Montage des Putzes zu Reizungen der Schleimhäute kommen.¹²⁷

Auf Grundlage von Daten der Ökobau-Datenbank¹²⁸ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wurde ein Vergleich der drei Dämmvarianten für das Treibhaus-Potenzial (GWP) in CO₂-Äquivalenzmengen, für den Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren (PEN) und nicht erneuerbaren (fossilen) Energiequellen (PENR) und der Wasserbedarf (FW) für die Herstellung angestellt (siehe Abb. 120). Daraus geht hervor, dass die Calciumsilikatplatten in allen Bereichen den sparsamsten Prozess aufweisen. Am schlechtesten schneidet Styropor ab, welches beispielsweise einen etwa doppelt so hohen Verbrauch an erneuerbaren Energien aufweist wie typische Wärmedämmputze (hier gehen noch nicht die Spezifika des Aerogel-Putzes ein) und einen um etwa 930-mal größeren Wert als die Calciumsilikatplatten. Auch hinsichtlich Wasserbedarf schneidet diese Lösung mit großen Abstand am besten ab.

Der Primärenergieverbrauch wurde auf die Größe des Plato-Wild-Ensembles hochgerechnet. Eine Beurteilung mit einem angestrebten U-Wert von ca. 0,50 W/(m²·K) anstelle des vorhandenen von ca. 1,4 W/(m²·K) im unsanierten Zustand über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren ist in Tab. 23 zusammengefasst. Dabei wurden die Kriterien Primärenergiebedarf (im Herstellungsprozess bzw. für die Erneuerung nach Ablauf der Lebensdauer), Investitionskosten (Material und Montage) und die Recyclingfähigkeit betrachtet. Hier zeigt sich die hohe Bedeutung der Weiterverwendung und -verwertung. Eine lange Lebensdauer und Nutzungsphase können die ökologische Gesamtbilanz der Dämmstoffe entscheidend verbessern. Dieser Aspekt ist besonders bei Naturdämmstoffen hervorzuheben (als Alternative zur Styropordämmung). Wie Diehl et al. (2012)¹²⁹ darstellen, sind diese alternativen Dämm-

¹²⁷ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Wecobis. Ökologisches Baustoffinformationszentrum, zuletzt geprüft am 03.06.2013.

¹²⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.): Datenbank ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter: <http://oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>, zuletzt geprüft am 28.11.2014.

¹²⁹ Diehl, Klaus; Quast, Norbert; Welteke-Fabrizius, Uwe (2012): Wie ökonomisch ist die ökologische Alternative? In: Bauen im Bestand

Dämmstoffe im Vergleich	Aerogel-Putz	Styropor-Dämmplatten	Calciumsilikat-Dämmplatten
Einsatz als...	Außendämmung	Außendämmung	Innendämmung
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	0,028	0,035	0,059
Diffusionswiderstandszahl	4 bis 5	20	2,5
Brandstoffklasse	nicht entzündlich	B1, schwer entflammbar	A1, nicht brennbar
Zusammensetzung	Hydraulischer Kalk, NHL 5, Kalkhydrat, Weißzement als Bindemittel; Aerogelgranulat, mineralische Leichtzuschläge; Wasserrückhaltemittel, Luftporenbilder, Hydrophobierungsmittel	Styrol, Pentan, Luft, Hexabromcyclododekan als Flammschutzmittel	Calciumoxid, Siliziumoxid, Zellulose, Wasser
Vorteile	originalgetreue Wandnachbildungen und gegliederter Oberflächen wie Gesimsbänder etc.; dünne Schichtdicken mit hoher Dämmwirkung; bauphysikalische Vorteile als Außendämmung	- einfach zu verarbeiten und kostengünstig; m.E. (Biozide o.ä. zur Algenvermeidung) keine Abgabe von schädlichen Stoffen an Boden oder Luft; resistent gegen Verrottung	schimmelhemmend (aufgrund hohem pH-Werts bei 10); diffusionsoffen und kapillaraktiv (reduziertes Tauwasserrisiko)
Nachteile	energieintensiver Herstellungsprozess; fehlende Langzeiterfahrung; hoher Kostenfaktor	energieintensiver Herstellungsprozess; erdölbasierter Herstellungsprozess (fossile Rohstoffe); nicht resistent gegen UV-Strahlung; schlechter Schallschutz	eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten (als Wandplatten im Innenraum); reduzierter Wohnraum; Sanierung muss in den Wohnräumen erfolgen (logistischer Nachteil)

Tab. 22 Vergleich von Aerogel-Dämmputz mit Dämmplatten aus Styropor (Außendämmung) und Calciumsilikat (Innendämmung)
Quelle: Puff, Simone; Melzl, Andreas; Wittmann, Ines (2013)

Dämmstoffe im Vergleich	Aerogel-Putz	Styropor-Dämmplatten	Calciumsilikat-Dämmplatten
Schichtdicke für $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	4 cm	5 cm	8 cm
Rohdichte	300 kg/m ³ (Annahme)	32 kg/m ³	270 kg/m ³
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar:			
pro kg	ca. 70 MJ/kg (allg. Wärmedämmputz)	95,6 MJ/kg	0,026 MJ/kg
pro m ³ (Volumen)	ca. 21.000 MJ/m ³	ca. 3.100 MJ/m ³	ca. 7 MJ/m ³
pro m ² (Oberfläche)	ca. 840 MJ/m ²	ca. 150 MJ/m ²	ca. 0,6 MJ/m ²
Kosten (gesamt, für 2.700 m ²)	ca. 960.000 Euro	ca. 460.000 Euro	ca. 520.000 Euro
Brandstoffklasse	nicht entzündlich	B1, schwer entflammbar	A1, nicht brennbar
Amortisationszeit	über 40 Jahre	33 Jahre	38 Jahre
Montageaufwand	hoch	mittel	hoch
Recyclingfähigkeit	nur bedingt/kein (Bauschutt)	ja	ja

Tab. 23 Vergleich der Dämmkonzepte hinsichtlich Primärenergiebedarf, Kosten, Amortisationszeit und Recyclingfähigkeit
Nach Puff, Simone; Melzl, Andreas; Wittmann, Ines (2013)

materialien in einer Vollkostenrechnung nicht sehr viel teurer; nicht die Kosten für den Dämmstoff spielen die entscheidende Rolle, sondern Lohnkosten, Baustelleneinrichtung, Gerüst und Putzoberfläche.

Calciumsilikat beiden Außendämmsystemen deutlich überlegen.

Ohne den detaillierten Heizwärmebedarfs- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorzugreifen, wurde auf Basis der dort ermittelten Zahlen auch ein Amortisationszeitraum errechnet. Er ergibt sich aus den Vorgaben des Bundeswirtschaftsministeriums zur Gaspreisentwicklung. Demnach liegt dies für die Calciumsilikatdämmung zwar fünf Jahre über der für die deutlich kostengünstigere Styropordämmung (deren Wirtschaftlichkeit in Bezug auf Heizwärmeeinsparungen durch eine dickere Ausführung noch gesteigert werden kann), aber im Sinne einer Ökobilanz ist hier

4. Brandschutz

4.1 Grundlagen

Brandschutz umfasst alle Maßnahmen, die einem Brand oder der Ausbreitung eines Brandes vorbeugen, die die Rettung von Menschen gewährleisten und wirksame Löscharbeiten zulassen.

Man unterscheidet vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz. Für den vorbeugenden Brandschutz sind alle Maßnahmen im Vorfeld zu treffen, um einer Entstehung oder Ausbreitung eines Brandes entgegenzuwirken. Dabei gibt es bauliche, anlagentechnische und organisatorische Aspekte des Brandschutzes.¹³⁰

- Baulicher Brandschutz berücksichtigt das Brandverhalten der Baustoffe und des Feuerwiderstands der Bauteile und Bauprodukte.
- Der anlagentechnische Brandschutz beinhaltet alle technischen Anlagen und Einrichtungen, die zu einer Verbesserung des Brandschutzes führen, z.B. Brandmeldeanlagen, Rauchsaugsysteme oder Feuerlöschanlagen.
- Der organisatorische Brandschutz umfasst die Ernennung von Brandschutzbeauftragten sowie die Erstellung von Feuerwehreinsatzplänen, Flucht- und Rettungsplänen, Alarmplänen sowie Brandschutzordnungen. Auch gezielte Schulungen und Evakuierungsübungen werden als organisatorischer Brandschutz bezeichnet.

¹³⁰ Koch, Stefan (2011): Brandschutz und Baurecht. Rechtssichere Beurteilung von Neubau und Bestand; mit Tab. Köln: Feuertrutz Verl. für Brandschutzpublikationen.

Gebäudeklasse	Erläuterung
GKI 1a	Freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ² .
GKI 1b	Land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude.
GKI 2	Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m ² .
GKI 3	Sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m.
GKI 4	Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m ² .
GKI 5	Sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude.

Tab. 24 Gebäudeklassen (GKI) nach Art. 2 BayBO

Um einen Brandschutznachweis aufstellen zu können, benötigt man unter anderem folgende Richtlinien und Verordnungen: Anerkannte Regeln der Technik, insbesondere die DIN 4102 (Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen), Richtlinien (z.B. Industriebaurichtlinie, Schulbaurichtlinie), Verordnungen (Versammlungsstättenverordnung, Aufzugsverordnung) und schließlich die Landesbauordnung, z.B. die Bayerische Bauordnung (BayBO, aktuelle Fassung von 2013), als rechtlich bindende Umsetzung der Musterbauordnung der Länder (MBO).

4.1.1 Gebäudeklassen

Im Brandschutz werden die zu untersuchenden Gebäude nach Art. 2 Abs. 3 Satz 1 BayBO in fünf Gebäudeklassen (GKI 1 bis GKI 5) eingeteilt (Tab. 24). Die einzelnen Gebäudeklassen unterscheiden sich in der Gebäudehöhe und der Größe der einzelnen Nutzungseinheiten. Nach Art. 2 Abs. 3 Satz 2 BayBO wird als Gebäudehöhe das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, bis zum Mittel der Geländeoberfläche bezeichnet. Zusätzlich ist zu überprüfen, ob ein Sonderbau vorliegt. Als Sonderbauten werden nach Art. 2 Abs. 4 BayBO Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung bezeichnet, wie z.B. Krankenhäuser oder Schulen.

Als Aufenthaltsraum werden diejenigen Räume bezeichnet, die zum längeren Aufenthalt von Menschen bestimmt und geeignet sind (Art. 2 Abs. 5 BayBO). Nach Art. 2 Abs. 6 BayBO werden Geschosse als oberirdisch bezeichnet, wenn die Deckenoberkante im Mittel mehr als 1,40 m über die Geländeoberkante hinausragt. Unter 1,40 m gilt es als Kellergeschoss.

Nutzungseinheiten sind z.B. Wohnungen oder Büros, die eine abgeschlossene Einheit darstellen. Eine Nutzungseinheit darf nicht als Fluchtweg einer anderen Nutzungseinheit dienen. Jedoch kann ein Fluchtweg von mehreren Nutzungseinheiten genutzt werden.

4.1.2 Bauteile

Zusätzlich zur Gebäudeeinteilung werden auch die einzelnen Bauteile in sogenannte Feuerwiderstandsklassen eingeteilt. Diese Feuerwiderstandsklassen sind abhängig von der Gebäudeklasse des jeweiligen Objektes. Mit zunehmender Gebäudeklasse steigen auch die Anforderungen der Bauteile bezüglich des Feuerwiderstandes. Tab. 25 zeigt die Anforderungen an verschiedene Bauteile unter Berücksichtigung der

MBO	Bauteile	GK1 1	GK1 2	GK1 3	GK1 4	GK1 5
§27	Tragende Wände, Stützen					
	im Dachgeschoss, wenn darüber keine Aufenthaltsräume möglich sind (oberstes DG)	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
	im Dachgeschoss, wenn darüber Aufenthaltsräume möglich sind	ohne	fh	fh	hfh	fb
	im Normalgeschoss	ohne	fh	fh	hfh	fb
	im Kellergeschoss	fh	fh	fb	fb	fb
§28	Außenwände					
	nichttragende Außenwände und Teile außenseitige Oberflächen	ohne	ohne	ohne	A oder fh B1	A oder fh B1
§29	Trennwände					
	von Nutzungseinheiten im obersten DG (Wohngebäude)	fh (ohne)	fh (ohne)	fh	fh	fh
	von Nutzungseinheiten im DG, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind (Wohngebäude)	fh (ohne)	fh (ohne)	fh	hfh	fb
	von Nutzungseinheiten im Normalgeschoss (Wohngebäude)	fh (ohne)	fh (ohne)	fh	hfh	fb
	von Aufenthaltsräumen im Kellergeschoss (Wohngebäude)	fh (ohne)	fh (ohne)	fb	fb	fb
	von Räumen mit Explosionsgefahr bzw. erhöhten Brandgefahren (Wohngebäude)	fb (ohne)	fb (ohne)	fb	fb	fb
§30	Brandwände und zulässige Wände anstelle von Brandwänden					
	Gebäudeabschlusswände	hfh o. fh/fb	hfh o. fh/fb	hfh o. fh/fb	hfh + M	fb + A + M
	innere Brandwände	entfällt	entfällt	hfh	hfh + M	fb + A + M
§31	Decken					
	im Dachgeschoss, wenn darüber keine Aufenthaltsräume möglich sind (oberstes DG)	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
	Im Dachgeschoss, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind	ohne	fh	fh	hfh	fb
	im Normalgeschoss	ohne	fh	fh	hfh	fb
	im Kellergeschoss	fh	fh	fb	fb	fb
	von Räumen mit Explosionsgefahr bzw. erhöhten Brandgefahren (Wohngebäude)	fb (ohne)	fb (ohne)	fb	fb	fb
§35	Wände notwendiger Treppenräume					
	in allen Geschossen treppenraumseitige Oberflächen	entfällt	entfällt	fh A	hfh + M A	fb + A + M A
§36	Wände notwendiger Flure					
	in Normal- und Dachgeschossen (flurseitige Oberflächen)	entfällt	entfällt	fh A	fh A	fh A
	in Normal- und Dachgeschossen (Wohngebäude)	fh (entfällt)	fh (entfällt)	fb	fb	fb
§39	Fahrschachtwände					
	in allen Geschossen schachtseitige Oberflächen	entfällt	entfällt	fh A	hfh A	fb + A A
Legende:				Bauteil-Klassifizierung nach DIN 4102-2		
A	nicht brennbarer Baustoff (auch als Beplankung in Verbindung mit B1)	fh	feuerhemmend	F 30-A, F 30-AB, F 30-B		
B1	schwer entflammbarer Baustoff	hfh	hochfeuerhemmend	F 60-A, F 60-AB		
M	geeignet für mechanische Einwirkung (Stoßbeanspruchung)	fb	feuerbeständig	F 90-A, F 90-AB		

Tab. 25 Anforderungen an Bauteile laut Musterbauordnung (MBO) der Länder. Für Details siehe auch Mayr, Josef; Battran, Lutz (2014): Brandschutzatlas. Baulicher Brandschutz. Stand September 2014. Köln: Feuertrutz Verl. für Brandschutzpublikationen.

von	nach	
	Notwendiger Flur	Notwendiger Treppenraum
Nutzungseinheit	D	
NE ≤ 200 m ²		VDS
NE > 200 m ²		T30-RS
Notwendiger Flur		RS
Keller-, Dachgeschoss		T30-RS
Werkräume, Lager, ...		T30-RS
Öffnungen in Trennwänden		T30-DS
Öffnungen in Brandwänden		T90-DS
Erklärung der Anforderungen:		Mögliche Ausführungen von Türen sind
V = vollwandig		VDS, RS, D, T30/60/90-DS oder T30/60/90-RS.
D = dichtschließend		
S = selbstschließend		
R = rauchdicht		

Tab. 26 Anforderungen an Türen gemäß BayBO

Gebäudeklasse.¹³¹

Als feuerhemmend (fh) werden diejenigen Bauteile bezeichnet, die bei einer Brandbelastung von 30 Minuten standsicher bleiben und/oder ihre raumabschließende Wirkung in dieser Zeit nicht verlieren (Feuerwiderstandsklasse F30 nach DIN 4102-2). Als hochfeuerhemmend (hfh) werden diejenigen Bauteile bezeichnet, die die genannten Bedingungen nach mindestens 60 Minuten Brandbelastung aufweisen (F60). Feuerbeständig (fb) sind Bauteile, die auch noch nach mindestens 90 Minuten Brandbelastung standsicher und/oder raumabschließend sind (F90). Zusätzlich zur Feuerbeständigkeit gibt es noch den Zusatz A oder B (Baustoffklasse). Dieser Zusatz beschreibt die Brennbarkeit der Baustoffe an. A steht für nichtbrennbare Baustoffe, B für brennbare Baustoffe. Hierbei wird noch zwischen A1 (ohne brennbare Bestandteile) und A2 (mit brennbaren Bestandteilen) bzw. zwischen B1, B2 und B3 (schwer/mittel/leicht entflammbar) unterschieden.

Bei Türen sind die Anforderungen im Brandschutz abhängig von den abzuteilenden Bereichen (Tab. 25).

Trennwände sind nach Art. 27 Abs. 1 und 3 BayBO raumabschließende Bauteile von Räumen und Nutzungseinheiten innerhalb eines Gebäudes, die ausreichend lang widerstandsfähig gegen eine Brandausbreitung sind. Außerdem müssen Trennwände dieselbe Feuerwiderstandsklasse aufweisen, wie die der tragenden und aussteifenden Bauteile des Geschosses (mindestens jedoch feuerhemmend). Trennwände zum Abschluss von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr müssen feuerbeständig sein. Trennwände sind nach Art. 27 Abs. 2 BayBO erforderlich:

- zwischen Nutzungseinheiten sowie Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen, ausgenommen notwendige Flure
- zum Abschluss von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr
- zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Kellergeschoss

Brandwände dienen nach Art. 28 Abs. 1 BayBO als raumabschließende Bauteile zum Abschluss von Gebäuden (Gebäudeabschlusswand) oder zur Unterteilung von Gebäuden in Brandabschnitte (innere Brandwand). Brandwände müssen ausreichend lang eine

Brandausbreitung auf andere Gebäude oder -abschnitte verhindern. Sie müssen nach Art. 28 Abs. 3 BayBO aus nichtbrennbaren Baustoffen (Typ A) bestehen und unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung trotzdem feuerbeständig sein. Um einen Brandüberschlag zu vermeiden, sollten Brandwände das Gebäude über die gesamte Höhe durchdringen.

Brandwände sind nach Art. 28 Abs. 2 BayBO erforderlich als:

- Gebäudeabschlusswand
- Gebäudeabschlusswand zwischen Wohngebäuden und landwirtschaftlich genutzten Gebäuden
- innere Brandwand (Abstand $\leq 40\text{m}$)
- innere Brandwand zur Unterteilung landwirtschaftlich genutzter Gebäude (Brandabschnitte $\leq 10\,000\text{ m}^3$)

4.1.3 Fluchtwege

Bei den Fluchtwegen ist darauf zu achten, dass pro Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege pro Einheit ins Freie führen. Es dürfen jedoch beide Rettungswege über denselben notwendigen Flur führen, wenn an diesen Flur zwei unabhängige Treppenhäuser angrenzen.

Als allgemeine Aufteilung der Rettungswege gilt Folgendes: Der 1. Rettungsweg führt direkt oder über einen notwendigen Treppenraum ins Freie; der 2. Rettungsweg bedingt Rettungsgeräte der Feuerwehr oder einen zweiten baulichen Rettungsweg, z. B. ein zweites Treppenhaus.

Die Anforderungen an die Wände des notwendigen Treppenraums sind von der jeweiligen Gebäudeklasse abhängig:

- | | |
|--------------|--|
| GKI 5: | feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen |
| GKI 4: | nichtbrennbare Baustoffe |
| GKI 3: | feuerhemmend oder aus nichtbrennbaren Baustoffen |
| GKI 1 und 2: | keine Anforderungen |

Ab GKI 3 muss der notwendige Treppenraum raumabschließend und zudem durchgehend über die gesamte Gebäudehöhe sein. Eine Entrauchung ist unabhängig von der Gebäudeklasse generell notwendig. Sie erfolgt

¹³¹ Mayr, Josef; Battran, Lutz (2014): Brandschutzatlas. Baulicher Brandschutz. Stand September 2014. Köln: Feuertrutz Verl. für Brandschutzpublikationen.

in jedem Geschoss entweder durch ein Fenster (mindestens 0,5 m²) oder eine Rauchabzugsöffnung (mindestens 1,0 m²) an der obersten Stelle. Brandlasten, wie beispielsweise Wandbekleidung oder Kleidungsstücke, sollten aus dem Treppenhaus entfernt werden.

4.1.4 Bestandsschutz

Der folgende Abschnitt bezieht sich auf das Schreiben des Bayerischen Staatsministeriums des Innern zum Brandschutz in bestehenden Gebäuden vom 25. Juli 2011.¹³² Eine bauliche Anlage ist bestandsgeschützt, wenn:

- sie genehmigt und genehmigungskonform errichtet worden ist (formeller Bestandsschutz),
- sie zum Zeitpunkt ihrer Errichtung dem geltenden Recht entsprochen hat (materieller Bestandsschutz)

und danach jeweils nicht rechtswidrig geändert worden ist. Ist eine bauliche Anlage bestandsgeschützt, können nur in Ausnahmen Anforderungen gestellt werden (z. B. zur Abwehr erheblicher Gefahren für Leben und Gesundheit). Dies ist z. B. der Fall, wenn die nach Art. 31 Abs. 1 BayBO regelmäßig geforderten zwei unabhängigen Rettungswege überhaupt nicht vorhanden sind oder wenn nur ein Rettungsweg vorhanden und mit Mängeln behaftet ist.

Grenzen bzw. Verlust des Bestandsschutzes

Der Bestandsschutz erlischt, wenn Veränderungen vorgenommen werden, die durch die Baugenehmigung nicht abgedeckt sind. Ein solcher Verlust des Bestandsschutzes kann unter anderem bewirkt werden durch:

- bauliche Maßnahmen (z. B. unsachgemäße Veränderung von Wänden und Decken, sodass die Feuerwiderstandsfähigkeit dieser beeinträchtigt wird)

¹³² Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (2011): Schreiben an die Bezirksregierungen zum „Vollzug der Bayerischen Bauordnung (BayBO); Brandschutz in bestehenden Gebäuden“, München.

- betrieblich/organisatorische Änderungen (z. B. Einrichtung von Aufenthaltsräumen, ohne dass die dafür erforderlichen Rettungswege vorhanden wären)
- drastische Erhöhung der Personenzahl, ohne dass die bestehenden Rettungswegbreiten darauf ausgelegt wären
- Änderung der Außenanlagen und damit ggf. auch der erforderlichen Flächen für die Feuerwehr

Im Plato-Wild-Ensemble ist der Bestandsschutz bisher gewahrt worden, da keine ausschließenden baulichen Veränderungen vorgenommen wurden.

Änderung im Bestand

Bei Umbauten oder Nutzungsänderungen in Gebäuden müssen die aktuell geltenden bauordnungsrechtlichen Anforderungen eingehalten werden. Dies bezieht sich nur auf die einzelnen Maßnahmen; nicht betroffene Bereiche genießen weiter Bestandsschutz.

Abweichung von Anforderungen

In besonderen Situationen, wo z. B. aus Gründen des Denkmalschutzes die aktuellen Brandschutzanforderungen durch die Maßnahmen nicht eingehalten werden können, ist eine Abweichung nach Art. 63 Abs. 1 Satz 1 BayBO unter Berücksichtigung der konkreten Umstände möglich. Dies ist in der Regel vertretbar, „wenn und soweit durch die beabsichtigte Maßnahme keine grundlegenden, die Genehmigungsfrage neu aufwerfenden Belange berührt werden (z. B. bei der Sanierung oder dem Austausch von Bauteilen oder wenn lediglich die Raumkonfiguration geändert werden soll)“¹³³.

Im Bestand ist die Durchführbarkeit von Maßnahmen im Detail zu prüfen und auf Abweichungen von den gültigen Normen und Verordnungen hinzuweisen. Geburtig (2012)¹³⁴ weist auf drei Kriterien hin, die im Einzelfall geprüft werden müssen:

- Tragfähigkeit einer Konstruktion im Brandfall (Feuerwiderstandsklasse F30, F60, F90 nach DIN 4102-2); dabei werden mittlerweile auch Zwischenbereiche angestrebt: So kann z. B. eine Holzbalkendecke eine Feuerwiderstandsfähigkeit

¹³³ Ebd., Abschnitt 2.2.

¹³⁴ Geburtig, Gerd (2012): „Spielregeln“ für brandschutztechnische Nachrüstungen. Brandschutzkonzepte im Bestand. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (3), S. 46–49.



Abb. 121 Brandschutzplan für die Fünfhäusergruppe Walderdorffstraße – Safferlingstraße – Lageplan
Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer (2014)

von 45 Minuten erreichen, wenn sie zusätzlich mit einer F30-Bekleidung beplankt wird.¹³⁵

- Raumabschluss: Über einen festgelegten Zeitraum dürfen keine Risse oder Fugen entstehen, durch die sich Feuer und Rauch ausbreiten.
- Die Temperatur an der brandabgewandten Seite darf sich im Mittel um maximal 140 K und punktuell maximal um 180 K erhöhen.

Umbau und bauliche Erweiterung des Bestands

Beschränkt sich die Änderung des Bestands auf einen abgrenzbaren Bereich, so muss nicht der gesamte Bestand an die geltenden Brandschutzanforderungen angepasst werden. Allerdings kann nach Art. 54 Abs. 5 BayBO verlangt werden, „dass auch von der Änderung nicht berührte Teile mit den geltenden Vorschriften in Einklang gebracht werden, wenn das aus Gründen des Art. 3 Abs. 1 BayBO erforderlich und dem Bauherrn wirtschaftlich zumutbar ist und diese Teile mit den Teilen, die geändert werden sollen, in konstruktivem Zusammenhang stehen oder unmittelbar mit ihnen verbunden sind“.¹³⁶ Dies betrifft häufig die Nachrüstung von Türen in den Wänden eines notwendigen Treppenraums, wenn das Dachgeschoss ausgebaut werden soll:

¹³⁵ Geburtig, Gerd (2010): Baulicher Brandschutz im Bestand – Beurteilung vorhandener Bausubstanz, 2. Aufl. Berlin: Beuth.

¹³⁶ Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (2011), Abschnitt 2.4.

„Hier besteht in der Regel zwischen den Teilen, die geändert werden sollen (z. B. neu zu errichtenden Wänden oder Türen im Dachgeschoss) und den von der Änderung nicht berührten Teilen (hier den Eingangstüren bestehender Wohnungen in den darunter liegenden Geschossen) weder eine unmittelbare (bauliche) Verbindung noch ein konstruktiver Zusammenhang.“¹³⁷

Bei der Nutzung eines bisher als Abstellfläche eingesetzten Dachraums als Wohnfläche sind daher die veränderten Anforderungen des Brandschutzes zu beachten, insbesondere der zweite Rettungsweg muss z. B. durch ausreichend große, anleiterbare Dachfenster gegeben sein. Der Bestandsschutz der vom Dachausbau nicht konstruktiv betroffenen Gebäudeteile (die bestehenden Wohnungen in den darunter liegenden Etagen) ist davon unberührt. Aufgrund der erhöhten Gefahr von Rauchbildung im Treppenhaus sollten jedoch zusätzliche Maßnahmen und weitergehende Anforderungen gestellt werden.

4.2 Plato-Wild-Ensemble

Die Gebäude wurden 1926 nach der damals gültigen Bayerischen Bauordnung vom 17. Februar 1901 errichtet. Es werden hier exemplarisch die Ergebnisse aus den Brandschutzuntersuchungen für die Fünfhäusergruppe Safferlingstraße 15 und 17 und Walderdorffstraße 2, 4 und 4a diskutiert (Abb. 121).¹³⁸

Im Fall des Plato-Wild-Ensembles wird von einem bestehenden formellen und materiellen Bestandsschutz ausgegangen. Die Genehmigungspläne liegen vor, eine genehmigungskonforme Ausführung wird angenommen. In den bestehenden Wohnungen ist der zweite Rettungsweg über straßenseitige Fenster gegeben.

Zu Beginn wird der vorhandene Zustand der Gebäude im Hinblick auf die aktuellen Brandschutzregeln untersucht. Dabei wird das Ziel verfolgt, eventuelle Gefahrenpotenziale zu erkennen und geeignete Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes aufzuzeigen. Dabei sind Dringlichkeit und Kosten gegeneinander abzuwägen. Das wichtigste Schutzziel des baulichen Brandschutzes dieser Wohnanlage soll der Personenschutz sein. Dieser wird durch die bestmögliche

¹³⁷ Ebd.

¹³⁸ Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer (2014): Gebäudemodernisierung Plato-Wild-Ensemble: Brandschutz bei Modernisierung und Nutzungsänderung (und bestehende Risiken). Interdisziplinäres Projekt im Masterstudiengang Bauen im Bestand. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

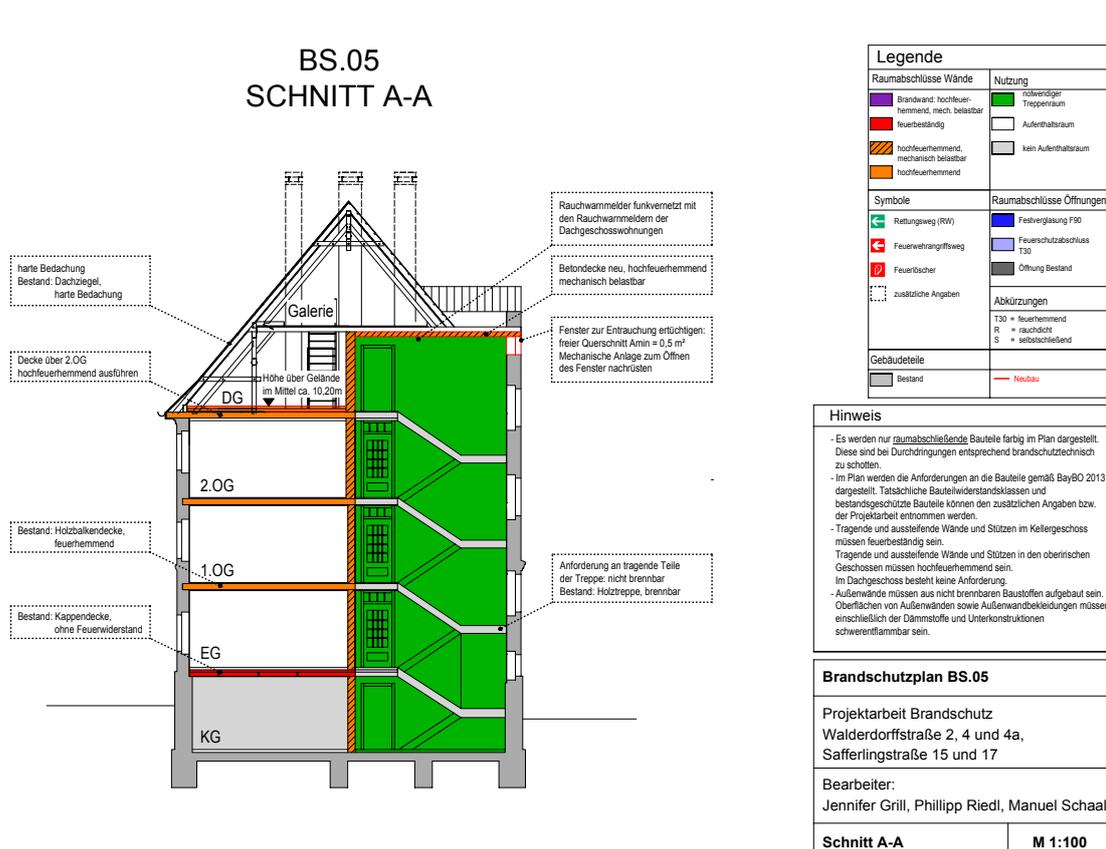


Abb. 122 Brandschutzplan für die Fünfhäusergruppe Walderdorffstraße – Safferlingstraße – Schnittbild
Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer (2014)

Ausbildung von Flucht- und Rettungswegen und die Anleitemöglichkeiten der Feuerwehr umgesetzt.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Darstellung der Konsequenzen, die ein Ausbau des Dachgeschosses nach sich ziehen würde. Unter Berufung auf den Bestandsschutz werden nicht alle Vorgaben aus der Bayerischen Bauordnung erfüllt; im Brandschutzkonzept wird dies in Form einer Abweichungsfeststellung erfasst.

4.2.1 Beurteilungsgrundlagen

Rechtsgrundlagen und Beurteilungshilfen

Das Gebäude ist nach den unten aufgeführten Normen und Richtlinien zu beurteilen:

- Bayerische Bauordnung (BayBO)
- Richtlinie über Flächen für die Feuerwehr (FeuerFIRI)
- Musterleitungsanlagenrichtlinie (MLAR)
- Musterlüftungsanlagenrichtlinie (MLüAR)

- Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (EltBauV)
- Feuerungsverordnung (FeuV)

Die Situation wird basierend auf den historischen Unterlagen, der im Projekt erarbeiteten Bauaufnahme und einer spezifischen Augenscheinnahme beurteilt.

4.2.2 Objektbeschreibung und Nutzung

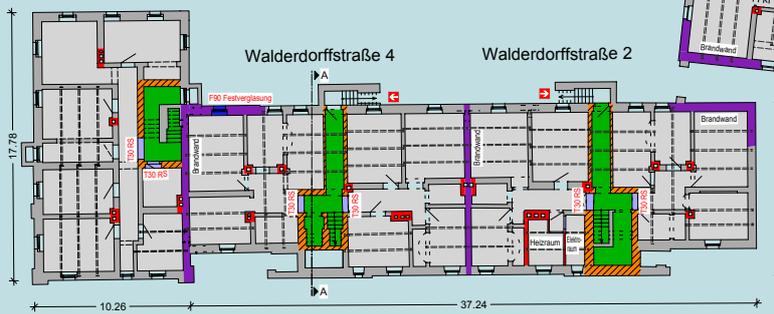
Die Anlage besteht aus einem Wohnkomplex mit fünf Einheiten. Die Einheiten Safferlingstraße 15 und 17 verfügen über ein Kellergeschoß, drei oberirdische Geschosse und ein ausgebautes Dachgeschoss. In den drei Obergeschossen befinden sich jeweils zwei Wohnungen. Im ausgebauten Dachgeschoss befindet sich jeweils eine Wohnung. Die Einheiten Walderdorffstraße 2, 4 und 4a verfügen ebenfalls über ein Kellergeschoß und drei oberirdische Geschosse. Derzeit ist das Dachgeschoss der Einheiten Walderdorffstraße 2, 4 und 4a nicht ausgebaut. Ein Ausbau ist eine Option für die Modernisierung.

Der betrachtete Bereich umfasst 32 Wohneinheiten (Nutzungseinheiten). Die Flächen der einzelnen Nutzungseinheiten liegen jeweils unter 400 m². Walderdorffstraße 2 und Safferlingstraße 15 sind vom

BS.01 GRUNDRISS KELLERGESSCHOSS

Bestand Kellergeschoss	
Tragende Wände und Stützen:	feuerbeständig
Trennwände:	feuerbeständig und raumabschließend
Treppenhauswände:	feuerbeständig, mechanisch belastbar
Brandwände:	feuerbeständig, mechanisch belastbar

Walderdorffstraße 4a



Safferlingstraße 15
Safferlingstraße 17



Legende	
Raumabschlüsse Wände	Nutzung
Brandwand, hochfeuerhemmend, mech. belastbar	rollentriegeliger Treppenraum
feuerbeständig	Aufenthaltsraum
hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	kein Aufenthaltsraum
hochfeuerhemmend	
Symbole	Raumabschlüsse Öffnungen
Rettenweg (RW)	Festverglasung F90
Feuerwehrgangsweg	Feuerschutzabschluss T30
Feuerlöscher	Öffnung Bestand
zusätzliche Angaben	
Abkürzungen	
T30 = feuerhemmend	
R = rauchdicht	
S = selbstschließend	
Gebäudeteile	
Bestand	Neubau

Hinweis

- Es werden nur raumabschließende Bauteile farbig im Plan dargestellt. Diese sind bei Durchdringungen entsprechend brandschutztechnisch zu schützen.
- Im Plan werden die Anforderungen an die Bauteile gemäß BayBO 2013 dargestellt. Tatsächliche Bauteilwiderstandsklassen und bestandsgeschützte Bauteile können den zusätzlichen Angaben bzw. der Projektarbeit entnommen werden.
- Tragende und ausstehende Wände und Stützen im Kellergeschoss müssen feuerbeständig sein. Tragende und ausstehende Wände und Stützen in den oberirdischen Geschossen müssen hochfeuerhemmend sein.
- Im Dachgeschoss besteht keine Anforderung.
- Außenwände müssen aus nicht brennbaren Baustoffen aufgebaut sein. Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein.

Brandschutzplan BS.01

Projektarbeit Brandschutz
Walderdorffstraße 2, 4 und 4a,
Safferlingstraße 15 und 17

Bearbeiter:

Jennifer Grill, Philipp Riedl, Manuel Schaal

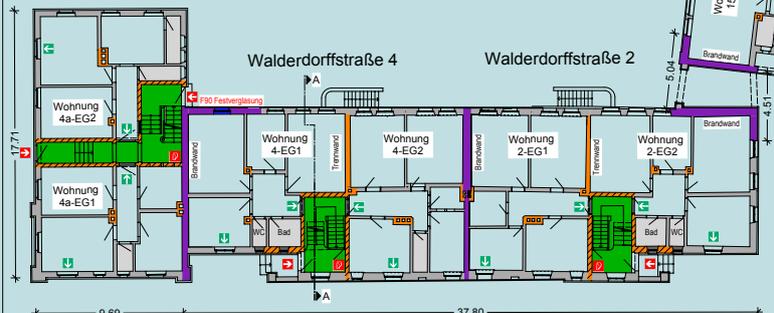
Grundriss KG

M 1:200

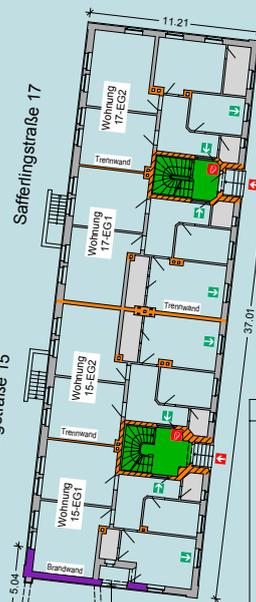
BS.02 GRUNDRISS ERDGESCHOSS

Bestand Erdgeschoss	
Tragende Wände und Stützen:	feuerbeständig
Trennwände:	feuerbeständig und raumabschließend
Treppenhauswände:	feuerbeständig, mechanisch belastbar
Brandwände:	feuerbeständig, mechanisch belastbar

Walderdorffstraße 4a



Safferlingstraße 15
Safferlingstraße 17



Legende	
Raumabschlüsse Wände	Nutzung
Brandwand, hochfeuerhemmend, mech. belastbar	rollentriegeliger Treppenraum
feuerbeständig	Aufenthaltsraum
hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	kein Aufenthaltsraum
hochfeuerhemmend	
Symbole	Raumabschlüsse Öffnungen
Rettenweg (RW)	Festverglasung F90
Feuerwehrgangsweg	Feuerschutzabschluss T30
Feuerlöscher	Öffnung Bestand
zusätzliche Angaben	
Abkürzungen	
T30 = feuerhemmend	
R = rauchdicht	
S = selbstschließend	
Gebäudeteile	
Bestand	Neubau

Hinweis

- Es werden nur raumabschließende Bauteile farbig im Plan dargestellt. Diese sind bei Durchdringungen entsprechend brandschutztechnisch zu schützen.
- Im Plan werden die Anforderungen an die Bauteile gemäß BayBO 2013 dargestellt. Tatsächliche Bauteilwiderstandsklassen und bestandsgeschützte Bauteile können den zusätzlichen Angaben bzw. der Projektarbeit entnommen werden.
- Tragende und ausstehende Wände und Stützen im Kellergeschoss müssen feuerbeständig sein. Tragende und ausstehende Wände und Stützen in den oberirdischen Geschossen müssen hochfeuerhemmend sein.
- Im Dachgeschoss besteht keine Anforderung.
- Außenwände müssen aus nicht brennbaren Baustoffen aufgebaut sein. Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein.

Brandschutzplan BS.02

Projektarbeit Brandschutz
Walderdorffstraße 2, 4 und 4a,
Safferlingstraße 15 und 17

Bearbeiter:

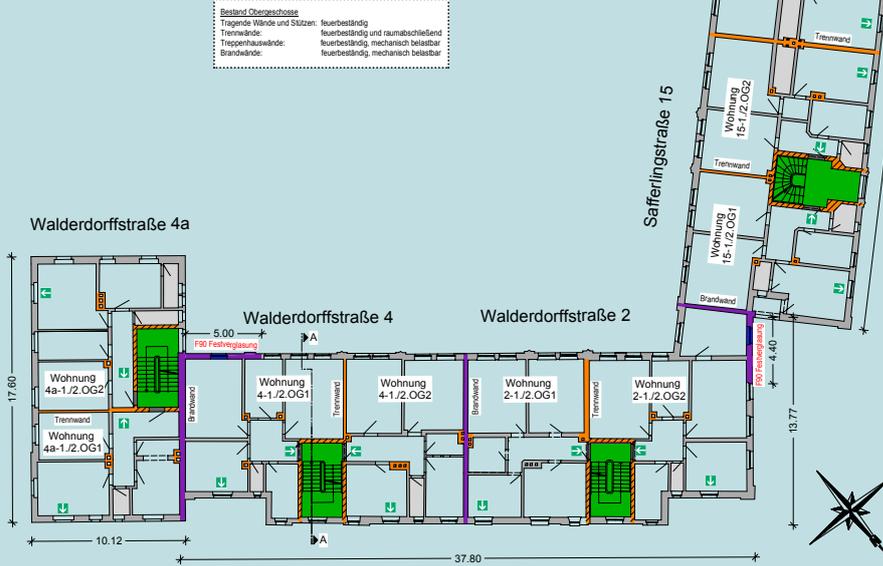
Jennifer Grill, Philipp Riedl, Manuel Schaal

Grundriss EG

M 1:200

Abb. 123 Brandschutzplan für die Fünfhäusergruppe Walderdorffstraße – Safferlingstraße – Keller und Erdgeschoss
Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer (2014)

BS.03 GRUNDRISS 1./2.OBERGESCHOSS



Bestand Obergeschoss
 Tragende Wände und Stützen: feuerbeständig
 Trennwände: feuerbeständig und raumabschließend
 Treppenhauwand: feuerbeständig, mechanisch belastbar
 Brandwände: feuerbeständig, mechanisch belastbar

Legende	
Raumabschlüsse Wände	Nutzung
Brandwand: hochfeuerhemmend, mech. belastbar	notwendiger Treppenraum
feuerbeständig	Außenhaltraum
hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	kein Außenhaltraum
hochfeuerhemmend	
Symbole	Raumabschlüsse Öffnungen
Rettenweg (RW)	Feistverglasung F90
Feuerwehrrangriffsweg	Feuerschutzabschluss T30
Feuertischer	Öffnung Bestand
zusätzliche Angaben	
Gebäudeteile	Abkürzungen
Bestand	T30 = feuerhemmend
Neubau	R = rauchdicht
	S = selbstschließend

Hinweis

- Es werden nur raumabschließende Bauteile farbig im Plan dargestellt. Diese sind bei Durchdringungen entsprechend brandschutztechnisch zu schützen.
- Im Plan werden die Anforderungen an die Bauteile gemäß BayBO 2013 dargestellt. Tatsächliche Bauteilwiderstandsklassen und bestandsgeschützte Bauteile können den zusätzlichen Angaben bzw. der Projektarbeit entnommen werden.
- Tragende und ausstufende Wände und Stützen im Kellergeschoss müssen feuerbeständig sein.
- Tragende und ausstufende Wände und Stützen in den oberirischen Geschossen müssen hochfeuerhemmend sein.
- Außentragende Wände müssen aus nicht brennbaren Baustoffen aufgebaut sein. Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließend der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein.

Brandschutzplan BS.03

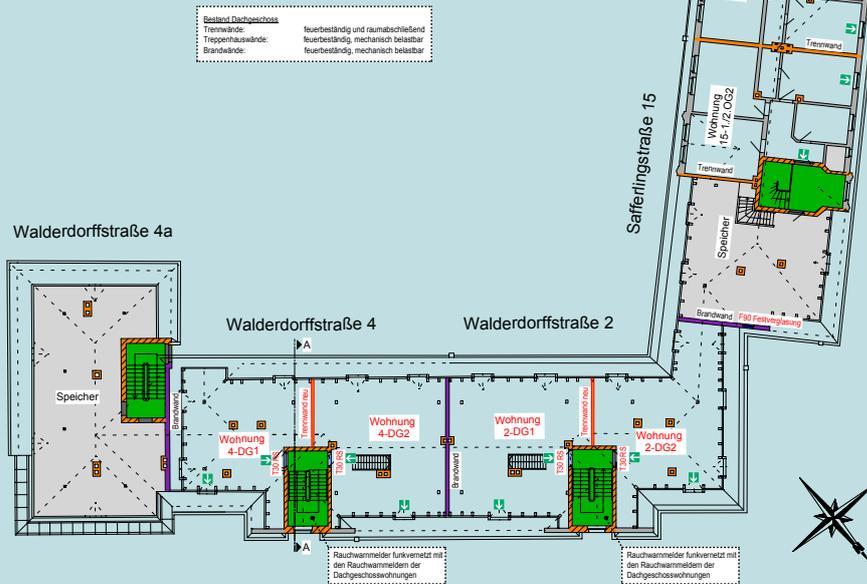
Projektarbeit Brandschutz
 Walderdorffstraße 2, 4 und 4a,
 Saferlingstraße 15 und 17

Bearbeiter:
 Jennifer Grill, Philipp Riedl, Manuel Schaal

Grundriss 1./2.OG

M 1:200

BS.04 GRUNDRISS DACHGESCHOSS



Bestand Dachgeschoss
 Trennwände: feuerbeständig und raumabschließend
 Treppenhauwand: feuerbeständig, mechanisch belastbar
 Brandwände: feuerbeständig, mechanisch belastbar

Legende	
Raumabschlüsse Wände	Nutzung
Brandwand: hochfeuerhemmend, mech. belastbar	notwendiger Treppenraum
feuerbeständig	Außenhaltraum
hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	kein Außenhaltraum
hochfeuerhemmend	
Symbole	Raumabschlüsse Öffnungen
Rettenweg (RW)	Feistverglasung F90
Feuerwehrrangriffsweg	Feuerschutzabschluss T30
Feuertischer	Öffnung Bestand
zusätzliche Angaben	
Gebäudeteile	Abkürzungen
Bestand	T30 = feuerhemmend
Neubau	R = rauchdicht
	S = selbstschließend

Hinweis

- Es werden nur raumabschließende Bauteile farbig im Plan dargestellt. Diese sind bei Durchdringungen entsprechend brandschutztechnisch zu schützen.
- Im Plan werden die Anforderungen an die Bauteile gemäß BayBO 2013 dargestellt. Tatsächliche Bauteilwiderstandsklassen und bestandsgeschützte Bauteile können den zusätzlichen Angaben bzw. der Projektarbeit entnommen werden.
- Tragende und ausstufende Wände und Stützen im Kellergeschoss müssen feuerbeständig sein.
- Tragende und ausstufende Wände und Stützen in den oberirischen Geschossen müssen hochfeuerhemmend sein.
- Im Dachgeschoss besteht keine Anforderung.
- Außentragende Wände müssen aus nicht brennbaren Baustoffen aufgebaut sein. Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließend der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein.

Brandschutzplan BS.04

Projektarbeit Brandschutz
 Walderdorffstraße 2, 4 und 4a,
 Saferlingstraße 15 und 17

Bearbeiter:
 Jennifer Grill, Philipp Riedl, Manuel Schaal

Grundriss DG

M 1:200

Abb. 124 Brandschutzplan für die Fünfhäusergruppe Walderdorffstraße – Saferlingstraße – 1./2. OG und Dachgeschoss
 Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer (2014)

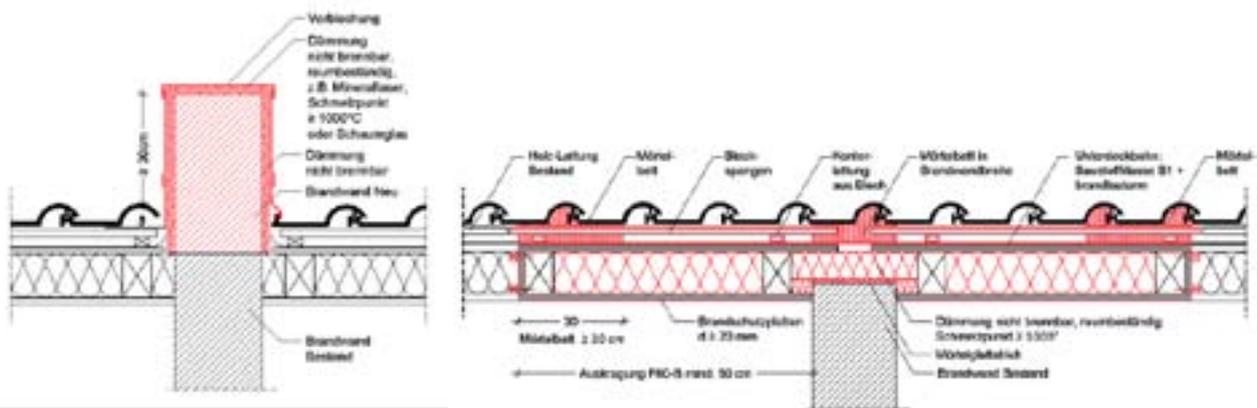


Abb. 125 Links: Brandwand, 30 cm über die Dachhaut geführt. Rechts: Alternative Lösung mit einer Brandwand bis zur Dachhaut, die um eine F60-Konstruktion ergänzt wird.
Quelle: Schaal et al. (2014) nach Mayr, Josef; Battran, Lutz (2014): Brandschutzatlas. Köln: Feuertrutz Verl. für Brandschutzpublikationen, S. 30.

1. Obergeschoss bis zum Dachgeschoss baulich miteinander verbunden (es besteht jedoch keine Durchgangsmöglichkeit). Detaillierte Angaben zu den Abmessungen der Gebäude sind den Brandschutzplänen (Abb. 121 bis Abb. 124) zu entnehmen.

4.2.3 Objektbeurteilung

Baurechtliche Einordnung

Es handelt sich nach Art. 2 Abs. 3 BayBO um Gebäude der Gebäudeklasse 4. Die Gebäudehöhen betragen im Mittel ca. 10,0 m. Die Gebäude sind nach Art. 2 Abs. 4 BayBO einzustufen als normale bauliche Anlagen ohne Räume besonderer Nutzung (kein Sonderbau) und lassen sich in einzelne Nutzungseinheiten (Wohnungen) einteilen, wobei keine der Einheiten über 400 m² misst.

Gefahrenreinschätzung

Es befinden sich weder besondere Brandgefahren noch besondere Brandlasten in den Wohnungen.

4.2.4 Baulicher Brandschutz

Tab. 27 gibt die Bewertung der Brandabschnitte im Objekt wieder.

Das Gebäude Walderdorffstraße 4a steht an der südöstlichen Seite mit mehr als 2,50 m Entfernung zur Grenze. Der nötige Abstand von 5,0 m zum gegenüberliegenden Gebäude ist gegeben. Die Gebäudeabschlusswand an der nordwestlichen Grenze zum Haus Walderdorffstraße 4 hin enthält diverse Öffnungen, u. a. die Fenster des notwendigen Treppenraumes. Um dessen Entrauchung weiterhin zu gewährleisten, wird

die Brandwand an der Südwestseite des Gebäudes Walderdorffstraße 4 geführt. Die Fenster, die sich in diesem Bereich befinden, müssen durch F90-Festverglasung ersetzt werden (markiert in Abb. 123 und Abb. 124). An der Grenze zwischen dem Gebäudeteil Walderdorffstraße 2 und 4 wird ebenfalls eine Brandwand erforderlich. In der Brandwand an der Nordostseite der Walderdorffstraße 2 sitzen Fenster mit weniger als 5 m (4,51 m im Erdgeschoss und 4,40 m im 1. und 2. Obergeschoss) Abstand zum Nachbargebäude. Diese können jedoch aufgrund der geringen Unterschreitung des minimalen Abstands und der geringen Gefahr, die von dem Balkon an der Safferlingstraße 15 ausgeht, akzeptiert werden – eine festzustellende Abweichung.

Das Gebäude Safferlingstraße 15 und 17 wurde auf einem Grundstück erbaut und erreicht mit einer Ausdehnung von 37,01 m noch nicht die maximal zulässige Brandabschnittslänge von 40 m. Daher ist zwischen den Gebäudeteilen Safferlingstraße 15 und Safferlingstraße 17 keine Brandwand erforderlich.

Bauliche Ausbildung der Brandwände

Gemäß Art. 28 Abs. 5 BayBO sind Brandwände in der Gebäudeklasse 4 mindestens 30 cm über die Dachhaut zu führen oder in Höhe der Dachhaut mit einer beiderseits 50 cm auskragenden feuerbeständigen Platte aus nichtbrennbaren Baustoffen abzuschließen. Brennbare Teile des Daches dürfen nicht durch die Brandwand geführt werden. In den bestehenden Gebäuden führen die Brandwände lediglich bis unter die Dachhaut. Des Weiteren werden brennbare Teile der Konstruktion (Pfetten, Lattung) über bzw. durch die Brandwand geführt. Daher müssen die Brandwände im Dachgeschoss ertüchtigt werden. Die optimale Lösung wäre die bestehende Brandwand freizulegen und aufzustocken, bis sie mindestens 30 cm über die Dachhaut führt. An der Dachkonstruktion sind dann keine zusätzlichen

Brandabschnitt	Rechtsgrundlage	Anforderungen	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht
äußere Brandwand	Art. 28 Abs. 2 Satz 1 BayBO	Gebäudeabschlusswand an der Grenze	Ertüchtigung der Bestandsituation nötig	nein
innere Brandwand	Art. 28 Abs. 2 Satz 2 BayBO	Zulässige Brandabschnittslänge: max. 40 m	Brandabschnittslänge: ca. 37,01 m	ja

Tab. 27 Brandabschnitte (Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer, 2014)

Maßnahmen nötig (siehe Abb. 125). Als Alternative kann die Brandwand bis an die Dachhaut geführt werden und an beiden Seiten mit einer F60-Konstruktion ergänzt werden (Abb. 125 rechts). In diesem Fall ist jedoch eine Abweichung von den Anforderungen festzustellen, da die Konstruktion mit brennbaren Teilen ausgeführt wird. Die Abweichung ist gerechtfertigt unter Verweis auf das ministerielle Schreiben zum Bestandsschutz, da das Gebäude Teil eines Ensembles ist und sich das Gebäude mit einer sichtbaren Brandwand, die 30 cm aus der Dachkonstruktion ragt, von den restlichen Gebäuden optisch unterscheiden würde.

Ebert und Müller (2013)¹³⁹ haben die Bauteile des Gebäudes Safferlingstraße 15 analysiert. Die Ergebnisse lassen sich auf die restlichen Gebäude übertragen.

Kellergeschoss

Tab. 28 fasst die Situation für das Kellergeschoss zusammen. Die Wand wird als „Wand anstelle einer Brandwand“ gemäß Art. 28 Abs. 3 Satz 2 Nr. 1 BayBO angesehen und muss daher auch unter zusätzlicher mechanischer Belastung hochfeuerhemmend (hfh+M) sein.

Die Kellerdecke ist als Kappendecke ausgeführt, bestehend aus 3 cm starken Dielen, die von Lagerhölzern getragen werden. Die Hölzer sind in eine Sandschicht eingebettet, die auf einer Betonschicht liegt, die den Anschluss an eine Gewölbekonstruktion aus Ziegel und Stahlträgern bildet (Abb. 126). Die Stahlträger übernehmen hier die tragende Funktion und sind im Brandfall frei dem Feuer ausgesetzt. Deshalb muss hier davon ausgegangen werden, dass die Decken über keine Feuerwiderstandsklasse verfügen.

Auch wenn die Kellerdecke Bestandsschutz genießt, kann eine Anpassung an die heutigen Anforderungen mithilfe einer geeigneten Beplankung („Fireboard“) der Stahlträger an der unteren Seite und einer ausreichenden dicken Estrichschicht an der oberen Seite erreicht werden, wodurch die Decke auf die Feuerwiderstandsklasse F90-A (fb) ertüchtigt wird.

¹³⁹ Ebert, Markus; Müller, David (2013): Brandschutz-Analysen für das Plato-Wild-Ensemble. Studienarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

Soll die Kellerdecke zusätzlich gedämmt werden, ist es ratsam, auf eine Gewölbedämmung zurückzugreifen, um Raumhöhe einzusparen. Dies kann durch nachträglich gedämmte Brandschutzplatten erfolgen. Alternativ ließe sich die Gewölbedämmung nachträglich vollflächig mit F90-Brandschutzplatten abhängen. Wichtig ist, dass auch die Aufhängung der Platten die Anforderung F90-A erfüllen muss.

Oberirdische Geschosse

Die Ergebnisse der Beurteilung finden sich in Tab. 29.

Brandwände: Die Wand wird als „Wand anstelle einer Brandwand“ gemäß Art. 28 Abs. 3 Satz 2 Nr. 1 BayBO angesehen und muss daher auch unter zusätzlicher mechanischer Belastung hochfeuerhemmend sein.

Decken über EG und OG: Die Geschossdecken sind Holzbalkendecken und können der Feuerwiderstandsklasse feuerhemmend (fh) aus brennbaren Bauteilen (F30-B) zugeordnet werden. Die heutige Anforderung hochfeuerhemmend (hfh) kann jedoch nicht erfüllt werden. Die Decken über dem Erdgeschoss sowie über dem 1. Obergeschoss genießen Bestandsschutz und müssen nicht ertüchtigt werden. Die Decke über dem 2. Obergeschoss ist jedoch von einem Dachgeschossausbau betroffen und müsste so ausgebaut werden, dass eine hochfeuerhemmende und raumabschließende Wirkung gegeben ist. Streng nach dem Schreiben des Innenministeriums zum Bestandsschutz wäre nur eine hochfeuerhemmende Wirkung von oben nach unten vorgeschrieben. Jedoch wäre es für den Schutz der Personen im Dachgeschoss sinnvoll, eine feuerhemmende Wirkung in beide Richtungen anzustreben. Diese erreicht man, indem lediglich die Oberseite der Decke erneuert wird und der Ausbau der Decke DIN 4102-4 Tab. 62 entspricht. Die untere Bekleidung der Holzbalken gilt hier als nicht vorhanden, die oberen Schichten garantieren die Feuerwiderstandsklasse. Eine Bemessung der Balken für den Brandfall wird er-

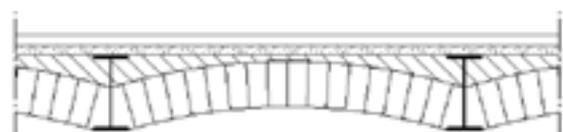


Abb. 126 Preußische Kappendecke mit freiliegenden Stahlträgern (Zeichnung: Zeitler)

Bauteile, Baustoffe	Rechtsgrundlage	Anforderung	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht:
Tragende Wände und Stützen im KG	Art. 25 Abs. 2 BayBO	feuerbeständig	Mauerwerk und Stampfbeton, feuerbeständig	ja
Trennwände im KG	BayBO Art. 27 Abs. 2 u. 3	feuerbeständig und raumabschließend	Mauerwerk und Stampfbeton, feuerbeständig und raumabschließend	ja
Brandwand	Art. 28 Abs. 3 BayBO	hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	Mauerwerk, feuerbeständig	ja
Decke über KG	Art. 29 Abs. 2 Bay BO	feuerbeständig und raumabschließend	Kappendecke, ohne Feuerwiderstandsdauer	nein

Tab. 28 Exemplarische Brandschutzbeurteilung von Kellerwänden und Kellerdecke im Plato-Wild-Ensemble (Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer, 2014)

forderlich.

Bei einer Komplettanierung sind alle Holzbalkendecken auf die Feuerwiderstandsklasse F60-B zu ertüchtigen; wie dies erfolgt, hängt davon ab, ob die alten Decken bestehen bleiben oder eine Entkernung geplant ist. Der Feuerwiderstand wird durch eine Estrichschicht und beidseitige Beplankung erreicht.

Geburtig (2014)¹⁴⁰ weist darauf hin, dass in Gebäuden der GKI 4 für die Geschossdecken zwar generell brennbare Bestandteile zulässig sind, aber tragende und aussteifende Bauteile allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben müssen. Die hfh-Klassifikation erreicht man für Holzbalkendecken nur über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise.¹⁴¹ Daran ist die Prüfung des „Kapselkriteriums“ nach DIN EN 13501¹⁴² geknüpft, das auch einen Raumabschluss einschließlich der Rauchgasübertragung umfasst und die Temperaturerhöhung auf der brandabgewandten Seite. Dieser Test lässt sich an einer Bestandskonstruktion natürlich nicht zerstörungsfrei durchführen, weshalb nur die Klassifikation F60-B nach DIN 4102-2 erzielt werden kann.

Um den Spitzboden im Dach als eigenständiges Geschoss nutzen zu können, müssten folgende Maßnahmen ergriffen werden: Ausbau mit Oberkante des Fertigfußbodens unter 13 m über dem Gelände, da das Gebäude sonst in Gebäudeklasse 5 fällt; Sicherstellung eines von der Feuerwehr einsehbaren und erreichbaren zweiten Rettungswegs (Dachflächenfenster sind

nicht ausreichend, da mehr als 1,0 m von der Traufkante entfernt); Tragkonstruktion (Stützen, Decke) im Dachgeschoss auf F60 ertüchtigen. Bedingt durch die Erschließung des Spitzbodens bliebe als Abweichung festzustellen, dass der notwendige Treppenraum entgegen Art. 33 Abs. 1 BayBO nicht durchgängig in alle Geschosse führt.

Aufgrund dieser Situation könnte der Spitzboden nur als Galeriegeschoss ausgebaut werden. Ein Galeriegeschoss gilt als nicht geschossbildend, daher ist weder ein zweiter Rettungsweg aus der Galerieebene noch ein Feuerwiderstand der Tragkonstruktion erforderlich. Voraussetzung für diese Bauart ist, dass Personen, die sich in der Galerie aufhalten, nicht stärker gefährdet sind als die Personen, die sich auf der unteren Ebene aufhalten. Um im Brandfall rechtzeitig alarmiert zu werden, muss das Geschehen auf der unteren Ebene von der Galerie aus überblickt und „erfahren“ werden können. Hierbei sind folgende Bedingungen einzuhalten:

- Die Galerie ist Bestandteil der unteren Dachgeschossesebene. Sie erstreckt sich im Wesentlichen auf den Raum (Hauptraum), mit dem sie in offener Sichtverbindung steht.
- Die Galerie ist nicht größer als die verbleibende Deckenöffnung zum Hauptraum (gemessen in Höhe der Galerie).
- Die Galerie hat keine angeschlossenen Aufenthaltsräume. Raumbildende Maßnahmen, z.B. durch Abgrenzung eines Raums, sind unzulässig.

Rettungswege

Die Bayerische Bauordnung fordert in Art. 31 Abs. 1 zwei voneinander unabhängige Rettungswege. Der erste Rettungsweg aus den Wohnungen führt stets durch den notwendigen Treppenraum (Tab. 30). Als zweiter Rettungsweg dienen Fluchtfenster zur Walderdorff- bzw. Safferlingstraße hin, das von den Rettungsgeräten der Feuerwehr erreicht werden kann. Die

¹⁴⁰ Geburtig, Gerd (2014): Für den Widerstand gerüstet. Den Brandschutz von Holzbalkendecken nachrüsten. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (6), S. 36–39.

¹⁴¹ M-HFHolzR (2004): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise.

¹⁴² DIN EN 13501-2:2010-2, „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten, Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen“.

Bauteile, Baustoffe	Rechtsgrundlage	Anforderung	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht:
Tragende und aussteifende Wände und Stützen im EG	Art. 25 Abs. 1 BayBO	hochfeuerhemmend	Mauerwerk, feuerbeständig	ja
Tragende und aussteifende Wände und Stützen im Dachgeschoss und Spitzboden	Art. 25 Abs. 1 BayBO	<i>Ausbau des Spitzbodens als Galeriegeschoss</i> - keine Anforderung	Holztragwerk	ja
Außenwände	Art. 26 Abs. 2 BayBO	nicht brennbar	Mauerwerk, verputzt, nicht brennbar	ja
Brandwand	Art. 28 Abs. 3 BayBO	hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar	Mauerwerk, feuerbeständig	ja
Decken über EG und OG's	Art. 29 Abs. 1 BayBO	hochfeuerhemmend	Holzbalkendecke, feuerhemmend	nein
Dachhaut	Art. 30 Abs. 1 BayBO	harte Bedachung	Ziegeldeckung, harte Bedachung	ja

Tab. 29 Brandschutzbeurteilung der oberirdischen Geschosse im Plato-Wild-Ensemble
(Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer, 2014)

Rettungswege sind ständig benutzbar zu halten. Sie dürfen nicht versperrt oder verstellt werden. Ihr Verlauf ist den Brandschutzplänen zu entnehmen.

Das Treppenhaus ist von Brandlasten und anderen behindernden Gegenständen frei zu halten (Regelung durch Hausordnung). Gemäß Art. 33 Abs. 1 BayBO wird für GKI 4 ein durchgängiger notwendiger Treppenraum gefordert. Der Treppenraum erstreckt sich vom Kellergeschoss bis zum Dachgeschoss. Da der Spitzboden als Galerie nicht als eigenes Geschoss gewertet wird, kann der Treppenraum als durchgängig angesehen werden. Wand- und Deckenbekleidungen innerhalb der notwendigen Treppenräume sind aus nichtbrennbaren Baustoffen (A) herzustellen. Bodenbeläge sind mindestens aus schwerentflammenden Baustoffen (B1) einzubauen (Art. 34 Abs. 5 BayBO). Für die bestehende Wand- und Deckenbekleidung sowie die Bodenbeläge besteht Bestandsschutz.

Der obere Abschluss des Treppenraums muss gemäß Art. 33 Abs. 4 BayBO hochfeuerhemmend und raumabschließend ausgeführt werden. Um einen Brandüberschlag von den Wohnungen zum Treppenhaus zu verhindern, ist dies auch in diesem Fall nötig. Hier gilt der Bestandsschutz nicht, da sich durch den Dachgeschossausbau ein höheres Gefahrenpotenzial ergibt. Als oberer Abschluss dient die Decke über dem Treppenraum. Um die hochfeuerhemmende und raumabschließende Funktion auch im Falle von herabfallenden Teilen der Dachkonstruktion zu gewährleisten, muss die Decke zusätzlich mechanisch belastbar sein. Als Maßnahme wäre hier u. U. der Neubau einer Betondecke unterhalb der Holzbalken denkbar.

Im Bestand ist der Zugang zum Kellergeschoss mit einer Stahltüre abgetrennt. Jedoch könnte im Brandfall im Kellergeschoss Feuer und Rauch bis zum Treppenbereich gelangen und den Holztreppe von unten

her in Brand setzen. Somit ist der erste Rettungsweg aus den Wohnungen bei einem Brand im Kellergeschoss gefährdet. Um den unteren Abschluss des Treppenraumes zu gewährleisten, müssen T30-RS-Türen in die Kellerwände eingebaut werden. Offene Kabelschächte im Bereich des notwendigen Treppenraums müssen entsprechend abgeschottet werden.

Öffnungen im Treppenraum (Art. 34 Abs. 6 BayBO) müssen zum Kellergeschoss feuerhemmend, rauchdicht- und selbstschließend (F30-RS) ausgeführt werden, zu den Wohnungen in Erd- und Obergeschossen vollwandig, dicht- und selbstschließend (VDS) und zu den Wohnungen im Dachgeschoss feuerhemmend, rauchdicht- und selbstschließend (T30-RS).

Die bestehenden Wohnungseingangstüren im Erdgeschoss sowie im 1. und 2. Obergeschoss sind einfache Holztüren ohne Feuerwiderstand oder dicht- bzw. selbstschließende Funktion, genießen jedoch Bestandsschutz. Die Türen sollten mit einem Selbstschließmechanismus versehen sein. Dies stellt eine kostengünstige Maßnahme dar. Im jetzigen Zustand kann bei Bränden in den Wohnungen der Rauch direkt ins Treppenhaus gelangen, wenn die Flüchtenden die Wohnungseingangstüren offen stehen lassen. Bei einer Komplettanierung müssten die Wohnungseingangstüren durch VDS-Türen ersetzt werden.

Für neue Wohnungen im Dachgeschoss sollten die heutigen Regeln eingehalten werden. Einige der heutigen Anforderungen werden im bestehenden Treppenraum nicht erfüllt, daher sind Kompensationsmaßnahmen nötig. Zudem sind die Wohnungen im Dachgeschoss aufgrund der Rauchbildung besonders gefährdet. Die Wohnungseingangstüren sollten hier nicht nur VDS, sondern feuerhemmend, rauchdicht und selbstschließend (T30-RS) sein.



Rettungswegführung	Rechtsgrundlage	Anforderung	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht:
Treppenlauf	Art. 32 Abs. 4 BayBO	nicht brennbar	Holtreppenlauf, brennbar	nein
Treppenräume	Art. 33 Abs. 1 BayBO	durchgehend	durchgehend	ja
Treppenraumwände	Art. 33 Abs. 4 BayBO	hochfeuerhemmend, mechanisch belastbar und raumabschließend	Mauerwerk, feuerbeständig, mechanisch belastbar und raumabschließend	ja
Rettungsweglänge	Art. 33 Abs. 2 BayBO	max. 35 m	< 30 m	ja

Tab. 30 Erster Rettungsweg über den notwendigen Treppenraum (Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer, 2014)

Zudem ist an der Decke im notwendigen Treppenraum ein Rauchwarnmelder anzubringen, der mit den vorhandenen Rauchwarnmeldern in den Dachgeschosswohnungen per Funk zu vernetzen ist. Im Falle einer Rauchbildung im Treppenhaus werden die Bewohner in den Dachgeschosswohnungen rechtzeitig gewarnt und sind dank der T30-RS-Türen mindestens 30 Minuten vor Brand und Rauch geschützt. Diese Zeit verbleibt, um von der Feuerwehr über den zweiten Rettungsweg gerettet zu werden. Alternativ können die bestehenden Wohnungseingangstüren aller oberirdischen Geschosse vollwandig, dicht- und selbstschließend ausgeführt bzw. ertüchtigt werden.

Die Bad- bzw. WC-Fenster im Bereich der überdachten Eingangsbereiche der Gebäudeteile Walderdorffstraße 2 und 4 könnten dazu führen, dass austretender Rauch den Fluchtweg über das Treppenhaus unbenutzbar macht. Von diesen Räumen geht aber nur eine geringe Brandgefahr aus, sodass hier keine Maßnahmen getroffen werden müssen.

Zweiter Rettungsweg: Als zweiter Rettungsweg sind Fluchtfenster vorgesehen, die von der Straße erreichbar sind. Folgende Mindestanforderungen sind zu erfüllen (Art. 35 Abs. 4 BayBO):

„Fenster, die als Rettungswege nach Art. 31 Abs. 2 Satz 2 BayBO dienen, müssen in der Breite mindestens 0,60 m, in der Höhe mindestens 1 m groß, von innen zu öffnen und nicht höher als 1,20 m über der Fußbodenoberkante angeordnet sein. Liegen diese Fenster in Dachschrägen oder Dachaufbauten, so darf ihre Unterkante oder ein davor liegender Austritt von der Traufkante horizontal gemessen nicht mehr als 1 m entfernt sein.“

Die bestehenden Fluchtfenster aus Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss erfüllen diese Anforderung. Die Fluchtfenster der innenhofzugeneigten Wohneinheiten in der Walderdorffstraße 4a können mit einer Tragleiter angeleitet werden. Im Falle eines Dachgeschossausbaus in der Walderdorffstraße 4a muss darauf geachtet werden, dass eine Rettung nur von der Walderdorffstraße aus möglich ist. Deshalb ist im Dachgeschoss lediglich eine Wohneinheit möglich, die

über ein Fluchtfenster in Richtung Walderdorffstraße verfügt.

Durchdringungen

Werden raumabschließende Bauteile nachträglich mit Versorgungsschächten oder einzelnen Leitungen durchdrungen, so sind diese durch eine für die durchdringende Leitung geeignete brandschutztechnische Abschottung zu verschließen. Anderenfalls müssen Schächte an jeder senkrechten Zu- oder Ableitung eine geeignete Brandschutzabschottung aufweisen. Die Anforderungen nachgerüsteter Abschottungen ergeben sich aus den aktuellen Richtlinien und nicht nach den tatsächlich bestehenden Bauteilen. Wird z.B. die Kellerdecke durchdrungen, sind die Abschottungen feuerbeständig auszuführen, auch wenn die Decke tatsächlich keine Feuerwiderstandsklasse aufweist. Zudem sind die jeweiligen Einbauanleitungen und Herstellerzulassungen zu beachten.

4.2.5 Anlagentechnischer Brandschutz

Rauchabzug und Rauchmelder, Blitzschutz

Der Rauchabzug im Treppenhaus wird gemäß BayBO Art. 33 Abs. 8 BayBO durch Fenster in jedem oberirdischen Geschoss mit jeweils einem freien Querschnitt von mind. 0,5 m², die geöffnet werden können, realisiert (Tab. 31). Um Raucheintritt in neue Dachgeschosswohnungen zu verhindern und eine wirksame Entrauchung des Treppenhauses zu ermöglichen, muss das oberste Fenster im Treppenhaus der Gebäude Walderdorffstraße 2 und 4 in dieser Form erneuert werden. Es muss über einen Öffnungsmechanismus vom Treppenpodest aus bedient werden können.

Seit dem Januar 2013 sind mit Einführung der neuen Bayerischen Bauordnung gemäß Art. 46 Abs. 4 Rauchwarnmelder in Wohnungen in Schlafräumen, Kinderzimmern sowie in Fluren, die zu Aufenthaltsräumen führen, vorgeschrieben. Bei der Errichtung neuer Dachgeschosswohnungen ist diese Regelung zu beachten. Die bestehenden Wohnungen sind ebenfalls

Rauchabzug	Rechtsgrundlage	Anforderung	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht:
Rauchabzug im Treppenraum	Art. 33 Abs. 8 BayBO	Fenster mit $A \geq 0,5\text{m}^2$ in jedem Geschoss	Ertüchtigung der Bestandsituation nötig	nein
Rauchmelder	Rechtsgrundlage	Anforderung	Tatsächliche Ausführung	Mindestanforderung erreicht:
Rauchmelder	Art. 46 Abs. 4 BayBO	Rauchmelder in Schlaf-, Kinderzimmer und Rettungswegen	Rauchmelder in Schlaf-, Kinderzimmer und Rettungswegen	ja

Tab. 31 Rauchabzug und Rauchmelder
(Quelle: Schaal, Manuel; Riedl, Philipp; Grill, Jennifer, 2014)

bis spätestens 31. Dezember 2017 dementsprechend auszustatten. Im Geschosswohnungsbau sind in der Praxis in allen als Schlafräume nutzbaren Räume (alle außer Bad, WC, Küche und Abstellkammern) Rauchwarnmelder anzubringen. Es bestehen keine Anforderungen an eine Brandmeldeanlage.

Lt. Art. 44 BayBO sind bauliche Anlagen, bei denen Blitzschlag leicht eintreten oder zu schweren Folgen führen kann, mit dauernd wirksamen Blitzschutzanlagen zu versehen. Der Gebäudekomplex ist frei stehend und von gleich hohen Gebäuden umgeben. Daher wird empfohlen, dieses mit einer dauernd wirksamen Blitzschutzanlage zu versehen. Besondere Beachtung verdient ein eventuell zu errichtender Kamin für eine zentrale Feuerungsanlage in Verbindung mit einem Holzvergaser-Blockheizkraftwerk (Kapitel G).

Haustechnische Anlagen, Feuerungsanlagen

Auf den bestehenden Leitungsanlagen besteht Bestandsschutz. Grundsätzlich sind alle neu zu errichtenden Leitungen nach der Musterleitungsanlagenrichtlinie (MLAR) mit den jeweiligen Brandschutzanforderungen zu schotten, unter Beachtung der Einbauanleitungen und Herstellerzulassungen. Dies gilt auch für eine Leitungssanierung, da hier der Bestandsschutz verfällt.

Eine nachträglich verbaute Lüftungsanlage mit geeigneter Lüftungszentrale hat der Musterlüftungsanlagenrichtlinie (MLüAR) zu entsprechen, Lüftungsschächte sind wie in 4.2.4 beschrieben auszuführen.

Der Heizraum muss den Bestimmungen der Feuerungsverordnung (FeuV) genügen. Im Falle einer Änderung der Energieversorgung (Kapitel G, Abschnitt 2 „Energiezentrale“) nach den geltenden Bestimmungen muss der bauliche Brandschutz neu bewertet werden. Gemäß der Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (EltBauV) sind eigene elektrische Betriebsräume erst für Nennspannungen über 1 kV nötig. Dies trifft hier nicht zu.

4.2.6 Organisatorischer Brandschutz

Eine Brandschutzordnung, Flucht- und Rettungspläne sind nicht erforderlich. Empfehlenswert im Hinblick auf die Rettung der Bewohner in den oberen Geschossen ist die Anfertigung von Feuerwehrplänen sowie einer Objektbeschreibung nach DIN 14095. Diese sind aber in der Regel nur bei Sonderbauten verpflichtend.

Abwehrender Brandschutz

Die erforderlichen Flächen für die Feuerwehr (Art. 5 Abs. 2 BayBO) können dem Brandschutzplan (Abb. 121) entnommen werden. Gegebenenfalls sind Parkverbote entlang der Straßen zu erlassen, um die nötigen Aufstellflächen sicherzustellen.

Die Löschwasserversorgung muss laut DVGW V 405 96 m^3/h für min. 2,0 Stunden betragen. Diese Leistung ist mit der örtlichen Feuerwehr abzustimmen und durch den Bauherren sicherzustellen. Hierbei ist der zuständige Wasserversorger einzuschalten. Eine Löschwasserrückhaltung ist nach der Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe (LöRüRI) nur dann erforderlich, wenn sich wassergefährdende Stoffe in großen Mengen in dem betroffenen Gebäude befinden.

Zur Brandbekämpfung von Entstehungsbränden in den einzelnen Wohnungen sind Handfeuerlöscher zu empfehlen, die im Treppenhaus aufgestellt werden und somit von allen Wohneinheiten zugänglich sind.

