

Abschlussbericht

FEUCHTEATLAS ZUR VERMEIDUNG PLANUNGSBEDINGTER FEUCHTESCHÄDEN

Neue Beurteilungskriterien zur Bewertung innen gedämmter Konstruktionen

U. Ruisinger, J. Grunewald

Dresden, 22. April 2009

Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden

finanziert durch: Bundesministerium für Wirtschaft
und Technologie (BMWi)
53107 Bonn

Förderkennzeichen: 0329663H

Projekträger: Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Ausführende Institution: Institut für Bauklimatik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Autoren: Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger
Prof. Dr.-Ing. John Grunewald

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der Feuchteatlas wurde unter Mithilfe von Architekturstudenten des 4. Semesters,
Jahrgang 2006, insbesondere durch Tobias Blaschke und Denes Honus erarbeitet.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. em. Peter Häupl.



Teil I Dokumentation

1	Einleitung	6
2	Berechnungsverfahren	10
2.1	Einführung	10
2.2	DIN-Verfahren	12
2.3	COND-Verfahren	16
2.4	Simulationsprogramm DELPHIN	22
2.4.1	Einführung	22
2.4.2	Theoretische Grundlagen	24
2.4.3	Materialfunktionen und -parameter	26
2.4.4	Kalibrierung des DELPHIN-Materialmodells	34
2.5	Zusammenstellung der Materialparameter	36
2.6	Strömungen in Hohlräumen und durch luftdurchlässige Baustoffe	37
3	Bewertungskriterien	40
3.1	Einführung	40
3.2	Stationäre Klimabedingungen	41
3.3	DIN- und COND-Kriterien	42
3.3.1	Mindestwärmeschutz	42
3.3.2	Transmissionswärmeverluste	42
3.3.3	Begrenzung der inneren Kondensatmenge	43
3.3.4	Begrenzung des inneren Dampfdiffusionswiderstandes	43
3.3.5	Vermeidung von Tauwasser und Schimmel	44
3.3.6	Wärmespeicherkapazität der innen liegenden Schichten	46
3.3.7	Beispielkonstruktion zur Demonstration der Kriterien	47
3.3.8	Ergebnisse nach DIN 4108	48
3.3.9	Ergebnisse nach COND	49
3.3.10	Zusammenstellung der Nachweise	51
3.4	Klimadaten für Simulationsverfahren	53
3.4.1	Auswahl der Testreferenzjahre (TRY)	53
3.4.2	Klimaelemente	54
3.4.3	Raumklima	58



3.5	Neue Kriterien für Simulationsverfahren	61
3.5.1	Kondensations- und Trocknungszyklen	61
3.5.2	Wärmeverluste durch Transmission	66
3.5.3	Mikroklima auf der Innenwandoberfläche	68
3.5.4	Temperatur- und Feuchteprofile, Frost-Tauwechsel	71
3.5.5	Belastungskennzahlen für biologische Schädigung	73
3.5.6	Belastungskennzahlen für mechanische Schädigung	75
3.5.7	Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion	77
3.5.8	Bewertung der Simulationsergebnisse	78
3.5.9	Hinweise für den Konstruktionskatalog	80
4	Zusammenfassung und Ausblick	82
4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	82
4.2	Ausblick	89
 Teil II Konstruktionskatalog		
0	Übersicht über Wandaufbauten	92
0.1	Grundkonstruktionsvarianten	92
0.2	Gestaltung des Gebäudewinkels	94
1	Innendämmung mit Calciumsilikat.....	96
1.1	Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	96
1.2	Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	104
1.3	Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	110
1.4	Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat	118
1.5	Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat	124
1.6	Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat	132
1.7	Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat	138
1.8	Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt	146
1.9	Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	152
1.10	Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	160
1.11	Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat	166
2	Innendämmung mit Cellulose und Dampfbremse	174
2.1	Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt	174
2.2	Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt	180



3	Innendämmung mit Holzweichfaserdämmplatte	188
3.1	Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten	188
3.2	Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten	194
3.3	Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten	202
3.4	Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz	208
4	Innendämmung mit Holzwolleleichtbauplatten.....	216
4.1	Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten	216
4.2	Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten	222
4.3	Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten	230
5	Innendämmung mit stehender Luftschicht	236
5.1	Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet	236
6	Innendämmung mit Mineraldämmplatte	245
6.1	Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten	244
6.2	Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten	250
6.3	Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten	258
6.4	Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)	264
6.5	Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten	272
6.6	Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten	278
7	Innendämmung mit Porenbetonsteinen	286
7.1	Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt	286
8	Innendämmung mit PUR-Platten	292
8.1	Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt	292
8.2	Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt	300
8.3	Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt	306
8.4	Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt	314
8.5	Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz	320
8.6	Altbauziegel, innen gedämmt mit Polyurethanplatten, außen hydrophobiert	328
9	Innendämmung mit Schaumglas.....	334
9.1	Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas	334
9.2	Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas	342



9.3	Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas	348
10	Innendämmung mit Wärmedämmlehm/-platten	356
10.1	Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm	356
10.2	Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm	362
10.3	Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm	370
10.4	Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten	376
10.5	Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten	384
10.6	Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten	390
11	Innendämmung mit Wärmedämmputz	
11.1	Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz	398
11.2	Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz	404
11.3	Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz	412
12	Außendämmung.....	418
12.1	Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System	418
13	Zweidimensionales Beispiel	426
13.1	Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm	426
Teil III Anhang		
A	Abkürzungsverzeichnis.....	432
B	Literatur	436
C	Materialtabelle und Kondensatmengen der unsanierten Varianten...	442
D	Klimadaten.....	444

I Dokumentation



1 Einleitung

Ausgangslage

Vor dem Hintergrund steigender Preise für Energie und Rohstoffe und der zunehmenden weltweiten Klimaproblematik sind alle Bereiche der Gesellschaft dazu angehalten, sparsam und effizient mit den natürlichen Ressourcen der Erde umzugehen. Das reflektiert sich auch in der aktuellen Forschungspolitik Deutschlands und in den entsprechenden gesetzlichen Bestimmungen, z.B. der Energieeinsparverordnung (EnEV). Energieoptimiertes Bauen ist eines der wesentlichen Handlungsfelder innerhalb des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Beim Neubau geht es darum, den Primärenergiebedarf zu halbieren. Das Fernziel sind Nullemissionshäuser. Ziel für die Gebäudesubstanz ist eine weitere grundlegende Verbesserung der Möglichkeiten einer konsequenten und nachhaltigen energetischen Sanierung.

Bei der energetischen Aufwertung von älteren Gebäuden mit geringem oder oft unzureichendem Dämmstandard sieht sich der Planer mit der Aufgabe konfrontiert, Lösungen für die bestehende Bausubstanz zu finden, die sowohl in baustofflicher, konstruktiver und gestalterischer Hinsicht verträglich sind. Die Gebäudehülle (Umfassungskonstruktion) ist ein wesentliches Element des gestalterischen und energetischen Gesamtkonzeptes eines Gebäudes. Ihre Ausführung ist maßgebend für die Transmissionswärmeverluste welche für Bestandsbauten häufig den Hauptanteil des Heizenergieverbrauchs darstellen. Gestiegene Ansprüche hinsichtlich des Wohnkomforts sind mit höheren Anforderungen an die Gebäudehülle in Einklang zu bringen und zu realisieren. Dabei müssen häufig auch unterschiedliche Wirkmechanismen und wichtige Einflussfaktoren wie Schlagregen, Frost, Salzausblühungen, Verwitterung oder organische Schädlinge bewertet werden, die mit den gängigen Bemessungsverfahren nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden können.

Zur hygrothermischen Bewertung von Umfassungskonstruktionen existieren verschiedene Bemessungsverfahren. Allerdings erfolgen diese Berechnungen mit vereinfachenden Annahmen, z.B. stationären Klimarandbedingungen (oder konstanten Monatsmittelwerten) und Vernachlässigung des kapillaren Feuchtetransports. Das kann in der Planungspraxis Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung von Umfassungskonstruktionen hervorrufen. Es ist zu erwarten, dass sich die Bauaktivitäten zukünftig weiter in Richtung Bestandssanierung verschieben und damit die Forderung nach einer ganzheitlichen Bewertung von Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit noch stärker in den Mittelpunkt rückt. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit durch die Anwendung von Standardverfahren unter Normklimabedingungen innovative Lösungen verhindert werden oder kurzlebige Konstruktionen zur Anwendung gelangen, weil wesentliche Wirkmechanismen unberücksichtigt bleiben.

Die ganzheitliche Bewertung von Umfassungskonstruktionen sollte neben baupraktischen und baustofflichen Aspekten auch die Berücksichtigung des realen Klimas beinhalten. Um das Verhalten von Gebäuden und baupraktischen De-



tails potenziell realitätsnah abzubilden, können Simulationsverfahren eingesetzt werden, welche die realen Materialeigenschaften durch genauere Modelle abbilden, als die Bemessungsverfahren dies können. Für die Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Planungspraxis erlangen Simulationsverfahren zunehmend Bedeutung. Deren qualifizierte Anwendung erfordert allerdings ein höheres Maß an Fachkenntnis.

Für die Interpretation der vielfältigen Ergebnisse bauphysikalischer Bewertungen mit Hilfe von Simulationsverfahren gibt es bisher kaum etablierte Kriterien. Vielen Bewertungsmöglichkeiten stehen keine äquivalenten Kriterien in den Bemessungsverfahren gegenüber. Eine Reihe von Fragen gilt es in diesem Zusammenhang zu beantworten. Führt die Anwendung eines Simulationsverfahrens zur gleichen Entscheidung bezüglich der Zulässigkeit einer Konstruktion? Können Grenzfälle mit Hilfe der Simulation genauer bewertet werden? Wie sinnvoll ist es, den Sicherheitsbereich mittels realitätsnäherer Abbildung der physikalischen Prozesse stärker einzugrenzen? Da der Arbeitsaufwand für die Aufbereitung und Auswertung von Simulationsrechnungen im allgemeinen höher liegt, kann der Nutzer einen Mehrwert in Form höherer Genauigkeit erwarten. Der realisiert sich aber erst dann, wenn die Kriterien entwickelt und implementiert worden sind.

Problemstellung

Das erste Ziel besteht in der Definition und Erläuterung von erweiterten Bewertungskriterien für Umfassungskonstruktionen, die auf neu entwickelten Algorithmen zur Auswertung von Simulationsergebnissen basieren. Diese Bewertungskriterien gehen bis zu einem gewissen Grad mit den etablierten Bemessungsverfahren konform, ergeben aber auf Grund der Vielfalt der Simulationsergebnisse ein neues, umfassenderes Bewertungsbild.

Ziele

Das zweite Ziel des Feuchteatlas besteht in der beispielhaften Anwendung und praxisbezogenen Erläuterung der Bewertungskriterien für eine Auswahl gängiger Umfassungskonstruktionen mit applizierten Innendämmsystemen. Die Untersuchung bezieht sich auf eine hinreichend große Anzahl (einen Katalog) von Konstruktionen, um die Verallgemeinerbarkeit der Schlussfolgerungen zu gewährleisten.

Unter kritischen Bedingungen verursacht der konvektive Transport in durch- oder hinterlüfteten Konstruktionen bzw. Hohlräumen den Hauptanteil an Energieverlusten und Schadenspotenzialen. Es existiert bisher kein etabliertes Verfahren, welches den Einfluss der Luftkonvektion auf die hygrothermischen Prozesse in Umfassungskonstruktionen erfasst. Das dritte Ziel umfasst daher die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens, welches in der Lage ist, den Einfluss von Luftströmungen auf den Feuchte- und Wärmehaushalt von Wand- und Dachaufbauten zu quantifizieren.

Die Ergebnisse neuer Simulationsverfahren werden mit denen herkömmlicher Bemessungsverfahren verglichen. Dabei kommen das am Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden entwickelte Simulationsprogramm DELPHIN (Version 4

Methodik und Forschungsansatz



1 Einleitung

und 5) unter realen Klimarandbedingungen sowie das analytische Bemessungsverfahren COND (IBK) und die Verfahren nach *DIN 4108* unter jeweils DIN-konformen Klimarandbedingungen zur Anwendung. Die eingehende Untersuchung verschiedener bauüblicher, eindimensionaler Standardwandaufbauten macht deutlich, in welchen Fällen die DIN-Algorithmen ungeeignet sind, weil innovative Lösungen fälschlicherweise als unzulässig eingestuft werden. Ein Vergleich von COND- und DIN-Verfahren zeigt, welchen Einfluss die Berücksichtigung des kapillaren Flüssigwassertransportes haben kann (Bemessung kapillaraktiver Systeme) und der Vergleich mit den DELPHIN-Ergebnissen demonstriert, wann auf ein Simulationsprogramm zurückgegriffen werden sollte und ob und wie weit die Ergebnisse der Bemessungsverfahren Sicherheitsreserven beinhalten.

Um den Einfluss von Luftströmungen zu quantifizieren, wurde ein Luftströmungsmodell in das Simulationsprogramm DELPHIN4 implementiert. Dieses neu entwickelte CFD-(Computational Fluid Dynamics) bzw. CaFD-(Cavity Fluid Dynamics)-Modul ist in der Lage, inkompressible, laminare Luftströmungen unter Berücksichtigung viskoser Eigenschaften in einem zweidimensionalen Gebiet zu berechnen. Der Energie- und (Feuchte-)Massenaustausch zwischen den durchströmten Bereichen und den angrenzenden Materialien sowie der Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen werden mit einberechnet.

Struktur und Gliederung

Der Feuchteatlas ist in drei Teile gegliedert. Teil I beschäftigt sich mit der ausführlichen Dokumentation der angewendeten Methoden, Verfahren und Kriterien, Teil II dokumentiert die Berechnungsergebnisse des Konstruktionskataloges und der Anhang (Teil III) enthält die zu Grunde gelegten Datentabellen und Verweise auf weiterführende Literatur.

In Teil I werden die Unterschiede zwischen dem Glaser- und dem COND-Verfahren herausgearbeitet und die eingehenden Materialparameter erläutert. Auf die Grundlagen des Simulationsverfahrens DELPHIN wird insoweit eingegangen, wie das zum Verständnis des Feuchteatlas notwendig ist. Auf weiterführende Literatur wird verwiesen. In der Simulation finden Materialfunktionen anstelle von Materialparametern Anwendung. Es wird dargelegt, wie die Materialparameter als Basisparameter der Funktionsansätze eingehen. Anschließend wird auf die verwendeten Klimarandbedingungen eingegangen. Teil I stellt außerdem die neu entwickelten Beurteilungskriterien vor. Die Herleitung und Bedeutung eines jeden Bewertungskriteriums wird ausführlich und unabhängig vom konkret verwendeten Modell diskutiert, sodass die Anwendung der neuen Bewertungskriterien nicht auf ein Simulationsverfahren beschränkt bleibt.

In Teil II wird eine Vielzahl von eindimensionalen Wand- und Dachaufbauten mit Hilfe der in Teil I entwickelten Kriterien analysiert. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Bemessungsverfahren und der Simulation können so miteinander verglichen werden. Ein ausgewähltes Simulationsbeispiel eines mehrdimensionalen konstruktiven Details ergänzt den Katalog, da Feuchteschäden oft zuerst an kritischen Details wie Gebäudedecken, Einbindungen oder An-



schlüssen auftreten. Eine umfassende Zusammenstellung mehrdimensionaler Details würde aber den Rahmen des Feuchteatlas sprengen.

Teil III schließlich stellt die verwendeten Material- und Klimadaten zusammen. Die Literaturverweise und das Abkürzungsverzeichnis komplettieren den Anhang.

Der Feuchteatlas ist eine Handreichung für die Praxis, um neue Wege bei der hygrothermischen Bewertung von Wand- und Dachaufbauten zu eröffnen. Die untersuchten Fälle beziehen sich neben Neubauten vor allem auf vorhandene und zu sanierende Baukonstruktionen, welche bei unsachgemäßer Ausführung ein großes Schadenspotential bergen. Der Feuchteatlas zielt darauf ab, den Leser für die hygrothermischen Belange dieser Konstruktionen zu sensibilisieren und möchte damit einen Beitrag zur Verbesserung der fachlich fundierten bauphysikalischen Beurteilung von Baukonstruktionen leisten.



2 Berechnungsverfahren

2.1 Einführung

Zielstellungen der Verfahren

Für die hygrothermische Analyse von Wand- und Dachaufbauten stehen verschiedene Bemessungs- und Simulationsverfahren zur Verfügung. Während die Bemessungsverfahren von konstanten Klimabedingungen ausgehen, wird bei Simulationsverfahren in der Regel reales Klima verwendet. Das macht die unterschiedlichen Zielstellungen der Verfahren deutlich: Mit einem Bemessungsverfahren wird bewusst nicht die Realität abgebildet, sondern man bemisst für einen Standard- oder Extremfall. Mit Simulationsverfahren wird dagegen versucht, so realitätsnah wie möglich zu rechnen ohne jedoch auf entsprechende Sicherheitsfaktoren zu verzichten.

Verfügbare Verfahren

Hygrothermische Bemessungsverfahren sind: Das Verfahren zur Bestimmung der Mindestanforderungen an den Wärmeschutz nach *DIN 4108-2*, das so genannte Glaser-Verfahren nach *DIN 4108-3*, das Monatsbilanzverfahren nach *DIN EN ISO 13788*, welches im wesentlichen auf dem Glaser-Verfahren aufbaut, oder das an der TU Dresden entwickelte COND-Verfahren. Anhang F der zuletzt aufgeführten Richtlinie nennt auch hygrothermische Simulationsverfahren, zu denen Softwareprogramme wie WUFI (Fraunhofer Institut für Bauphysik) oder DELPHIN (Technische Universität Dresden) zählen. Diese Aufzählung ist keineswegs vollständig. Es ist davon auszugehen, dass weltweit mehr als zwei Dutzend mehr oder weniger anwenderfreundliche Simulationsverfahren auf diesem Gebiet entwickelt wurden. Die Mehrzahl davon ist allerdings im Rahmen von Forschungsprojekten oder Doktorarbeiten entstanden, was zur Folge hat, dass die Programme oft nach Projektende nicht weiter entwickelt wurden und später nicht mehr genutzt werden können.

Aufwand und Genauigkeit

Die aufgezählten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Eingabe- bzw. Rechenaufwand und Genauigkeit. Während in den Bemessungsverfahren noch „mit Hand“ gerechnet werden kann, ist das bei Simulationsverfahren durch die Vielzahl der Rechenoperationen nicht mehr möglich. Schließlich sind die Simulationsverfahren erst durch die Entwicklung der Rechentechnik und der numerischen Lösungsverfahren möglich geworden. Die Einschränkungen der Bemessungsverfahren sind aufgrund der analytischen Lösungsmethoden umfangreicher als bei den Simulationsverfahren, deren numerische Lösungsmethoden größere Freiheiten in der physikalischen Modellierung erlauben. Einige Einschränkungen der Bemessungsverfahren werden beispielsweise im Abschnitt 6.3 der *DIN EN ISO 13788* aufgezählt. Das bedingt natürlich eine potenziell höhere Genauigkeit der Simulationsverfahren, wenn entsprechend genauere Eingabedaten zur Verfügung stehen. Die größere Freiheit in der Modellierung wird aber durch einen höheren Aufwand bei der Beschaffung der Eingabewerte (Konstruktion, Materialkennwerte, Klima) erkauft. Auch die Vielfalt der Ergebnisse kann einen höheren Aufwand bei der Auswertung bedeuten.



Aus den zur Verfügung stehenden Verfahren wurden neben den DIN-Verfahren, das COND-Verfahren und das Simulationsprogramm DELPHIN ausgewählt, um anhand eines Konstruktionskataloges vergleichende Berechnungen durchzuführen. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 ist eine Übersicht zu den berücksichtigten Transport- und Speicherprozessen der ausgewählten Verfahren zusammengestellt, die in den folgenden Abschnitten diskutiert werden sollen. Von Interesse sind dabei sowohl die Voraussetzungen und die Einschränkungen als auch die eingehenden Parameter.

Übersicht verwendete Verfahren

Tab. 2.1: Übersicht zu den Verfahren: berücksichtigte Transport- und Speicherprozesse

	DIN	COND	DELPHIN
Wärmeleitung (Latentwärme)	Konstante Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme nicht berücksichtigt)	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme nicht berücksichtigt)	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme berücksichtigt)
Wärmespeicherung	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Feuchteabhängige Wärmespeicherung
Dampfdiffusion	Konstante Dampfleitfähigkeit	Konstante Dampfleitfähigkeit	Feuchteabhängige Dampfleitfähigkeit
Kapillarer Flüssigwassertransport	Nicht berücksichtigt	Linear ansteigender Flüssigwassertransport, Diffusionsmodell	Feuchteabhängiger Flüssigwassertransport, Diffusionsmodell und Kapillardruckmodell alternativ
Feuchte-speicherung	Aus Differenz der zu- und abfließenden Dampfdiffusionsströme	Aus Differenz der zu- und abfließenden Feuchteströme (Dampfdiffusion + kapillarer Transport) Hygroskopische Aufladung nach linearisierter Feuchtespeicherfunktion	Aus Differenz der zu- und abfließenden Feuchteströme (Dampfdiffusion + kapillarer Transport) Hygroskopische Aufladung nach gemessener Feuchtespeicherfunktion
Luftströmung	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Luftdruckprofilberechnung, konvektive Luftströmung durch Druckgradienten und thermischen Auftrieb
Phasenumwandlungen	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Bilanzierung der Verdunstungs- und Kondensationsprozesse mit Berücksichtigung der Verdunstungskühlung
Klimarandbedingungen	Konstant nach DIN 4108	Konstant (DIN) oder andere sinnvolle konstante Werte	Beliebig konstant, Testreferenzjahr oder real gemessenes Klima



2 Berechnungsverfahren

2.2 DIN-Verfahren

Für die hygrothermische Bemessung von Umfassungskonstruktionen stehen genormte Verfahren zur Verfügung, die dem Wärmeschutz, dem Feuchteschutz und der Energieeinsparung in Gebäuden dienen. Hier sollen die Grundzüge der Verfahren so weit dargestellt werden, wie es zum Verständnis der Unterschiede zwischen den DIN-, dem COND- und dem DELPHIN-Verfahren notwendig ist.

Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2

Zum Nachweis des Mindestwärmeschutzes von Bauteilen nach DIN 4108-2 ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U -Wert) der Konstruktion aus den inneren und äußeren Wärmeübergangswiderständen der Bauteiloberflächen, R_{Si} und R_{Se} , und der Summe der Wärmedurchlasswiderstände R der Schichten zu berechnen. Als Materialparameter gehen die Schichtdicken d_k und die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit der Materialschichten, $\lambda_{R,k}$, ein.

$$R = \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{\lambda_{R,k}} \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{\lambda_{R,k}} + R_{Se}} \quad (2.2)$$

Die Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengesetzter Bauteile, z.B. bei Fachwerkbauweise, werden entsprechend des Flächenanteils der einzelnen Schichten berechnet (flächengewichtetes Mittel, siehe *DIN 6946*). Der mittlere U -Wert eines Gebäudes ermöglicht eine Einschätzung der winterlichen Heizenergieverluste infolge Wärmetransmission durch die Gebäudehülle. Voraussetzung dafür ist die Angabe einer winterlichen mittleren Temperaturdifferenz und einer Heizperiodendauer.

Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3

Das Glaser-Verfahren ist eine Methode zur hygrischen Bemessung von Umfassungskonstruktionen. Eine ausführlichere Beschreibung ist in *DIN 4108-3* gegeben. Die hygrische Bemessung von Umfassungskonstruktionen erfolgt für den Winterfall (Ermittlung der Menge des ausfallenden Kondensats) und für den Sommerfall (Ermittlung der Verdunstungsmenge) in fünf Schritten:

1. Berechnung des stationären Temperaturprofils
2. Bestimmung des Sättigungsdampfdruckverlaufs aus den Temperaturen.
3. Bestimmung der Kondensatebene (grafisch oder rechnerisch)
4. Berechnung der Dampfdiffusionsströme von innen zur Kondensatebene und von der Kondensatebene nach außen (Winterfall) bzw. von der Kondensatebene nach innen und außen (Sommerfall)
5. Berechnung der Kondensat- und der Verdunstungsmenge und Vergleich mit den Kriterien.



Der Unterschied zwischen den Berechnungen für den Winterfall (Kondensationsperiode) und den Sommerfall (Verdunstungsperiode) ist durch die Randbedingungen gegeben, welche die Richtung der Dampfdiffusionsströme bestimmen.

Tab. 2.2: Klimarandbedingungen des Glaserverfahrens aus DIN 4108-3 (siehe auch Tabelle 3.1)

	Raumklima	Außenklima
Winterfall	20°C, 50% r.F.	-10°C, 80% r.F.
Sommerfall Wand	12°C, 70% r.F.	12°C, 70% r.F.
Sommerfall Dach	12°C, 70% r.F.	20°C, 70% r.F.

Die Vereinfachungen des Glaser-Verfahrens sollen hier bezüglich der Berechnung des Temperaturfeldes zusammengefasst werden:

Berechnung des Temperaturfeldes

- das Temperaturfeld bleibt konstant, es wird keine Wärmeenergie mehr gespeichert
- es wird ein eindimensionaler Wärmefluss angenommen, d.h. Wärme wird nur in x-Richtung geleitet
- die Wärmeleitfähigkeit bleibt unabhängig von anderen physikalischen Zustandsgrößen (d.h. Feuchtegehalt) konstant

Die Wärmestromdichte q ist proportional zum Temperaturgradienten $d\theta/dx$ (1. Ficksches Gesetz). Der Transportkoeffizient ist der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit des Materials, λ_R .

$$q = -\lambda_R \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad \text{Wärmestromdichte in W/m}^2 \quad (2.3)$$

Im stationären Zustand erfolgt keine Änderung der Temperatur mehr. Die Wärmestromdichte q ist demnach an allen Schichtgrenzen und daher auch an jeder Stelle innerhalb der Schicht gleich groß (Abbildung 2.1).

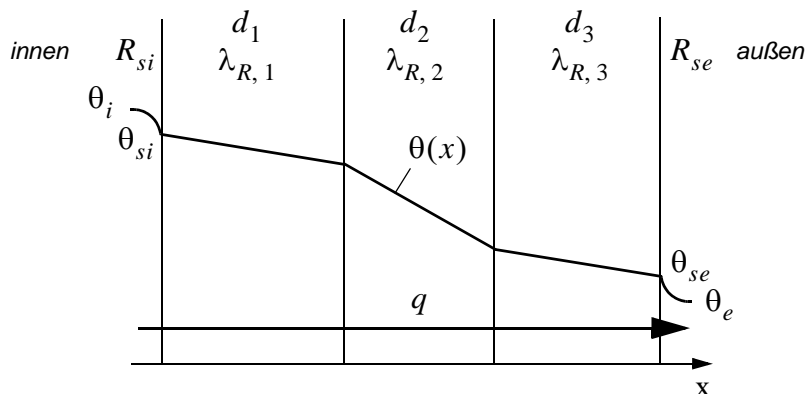


Abb. 2.1: Stationäre Wärmeleitung innerhalb einer dreischichtigen Konstruktion



2 Berechnungsverfahren

Das Temperaturfeld $\theta(x)$ bzw. die Schichtgrenztemperaturen bei mehrschichtigen Konstruktionen ergeben sich aus der obigen Bedingung, dass die Wärmestromdichte konstant ist. Die Schichtgrenztemperaturen können dann mit $k = 1 \dots N$ sukzessive mit Hilfe von Gleichung (2.5) und (2.5) bestimmt werden, wenn N die Anzahl der Schichten ist.

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2.4)$$

$$q = \frac{1}{R_i} \cdot (\theta_i - \theta_{oi}) = \frac{\lambda_R}{d_k} \cdot (\theta_k - \theta_{k+1}) \quad (2.5)$$

Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungs- menge

Für jede Schichtgrenze kann aus den Temperaturen der jeweilige Sättigungsdampfdruck berechnet werden. Die Berechnung des Wasserdampfpartialdruckprofils ist nicht zwingend vorgeschrieben, kann aber auf analoge Weise wie die Berechnung des Temperaturprofils durchgeführt werden, wenn man die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken nach Gleichung (2.6) an Stelle der Wärmedurchlasswiderstände verwendet und die Wärmeübergangswiderstände durch Dampfübergangswiderstände ersetzt. Erreicht oder überschreitet der berechnete Partialdruck an einer oder mehreren Stellen den Sättigungsdampfdruck, so kommt es zur Kondensation.

Es existiert auch ein grafisches Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfpartialdrücke. Die Konstruktion wird zunächst im Maßstab der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d gezeichnet und das Sättigungsdampfdruckprofil eingetragen.

$$s_{d,k} = \mu_k d_k \quad \text{Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m} \quad (2.6)$$

Die Partialdrücke zu beiden Seiten der Konstruktion werden dann auf kürzestem Weg verbunden, ohne jedoch das Sättigungsdampfdruckprofil zu schneiden. Bei diesem Verfahren werden vier Fälle nach Abbildung 2.2 unterschieden.

1. Der vorhandene Wasserdampfpartialdruck ist stets kleiner als p_{sat} , es entsteht kein Tauwasser.
2. Die Partialdrucklinie berührt das Sättigungsdampfdruckprofil an genau einer Stelle, es entsteht Tauwasser an dieser Schichtgrenze.
3. Das Sättigungsdampfdruckprofil wird zweimal berührt, es entsteht Kondensat in allen Schichten zwischen den Berührungspunkten.
4. Das Sättigungsdampfdruckprofil wird zweimal berührt, es entsteht Kondensat an zwei Schichtgrenzen. Die beiden Kondensatbereiche berühren sich nicht.

Fällt Kondensat aus wird die Tauwassermenge $m_{W,T}$ in kg/m^2 nach Gleichung (2.7) berechnet (siehe Nicolai 2002 und DIN 4108-3). Dabei bezeichnen die Indizes k_1 und k_2 die beiden links und rechts der Berührungspunkte liegenden Schichten. Sollte nur in einer Ebene Kondensat auftreten (Fall 2), gilt $k_2 = k_1 + 1$. Die Tauwassermenge wird so als Differenz der ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfmenge berechnet. Die Dauer der Tauperiode wird in

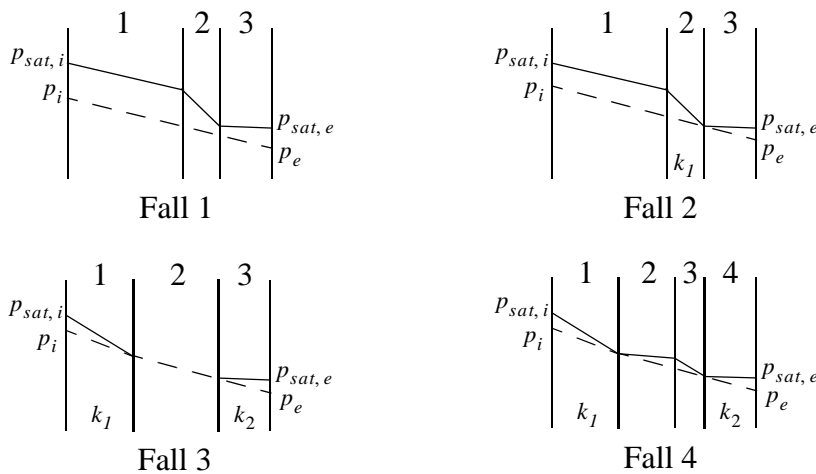


Abb. 2.2: Fallunterscheidungen beim Glaserschema

der DIN 4108-3 mit $t_T = 1440 \text{ h}$ angegeben. Die Berechnung der Verdunstungsmenge erfolgt analog, nur unter den Randbedingungen für den Sommerfall. Die Dauer der Verdunstungsperiode beträgt laut DIN 4108-3 $t_V = 2160 \text{ h}$.

$$m_{W,T} = \delta_d \cdot \left(\frac{p_i - p_{sat,k_1}}{S_i} - \frac{p_{sat,k_2} - p_e}{S_e} \right) \cdot t_T \quad (2.7)$$

$$m_{W,V} = \delta_d \cdot \left(\frac{p_i - p_{sat,k_1}}{S_i} + \frac{p_{sat,k_2} - p_e}{S_e} \right) \cdot t_V \quad (2.8)$$

$$\text{mit } \delta_d = 1,9 \times 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}} = \frac{1}{1,5 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{h}} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}}$$

$$S_i = \sum_{k=1}^{k_1} s_{d,k} \quad S_e = \sum_{k=k_2}^N s_{d,k}$$

Die berechneten Tauwasser- und Verdunstungsmengen werden dann nach Normkriterien bewertet. Das bedeutet im Normalfall eine Begrenzung der Kondensatmenge auf maximal 1 kg/m^2 . Zusätzlich darf die Menge des Kondensats die Verdunstungsmenge nicht übersteigen, um die Austrocknung im Sommer zu gewährleisten. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Kriterien der hier verwendeten Verfahren erfolgt in Kapitel 3.

An Materialparametern benötigt das Glaserverfahren dazu lediglich die Wärmeleitfähigkeit λ_R (siehe DIN 52616) und den Wasserdampfdiffusionswiderstandswert μ (siehe DIN EN ISO 12572, ohne Einheit).



2 Berechnungsverfahren

2.3 COND-Verfahren

Unterschiede zum DIN-Verfahren

Die Berechnung nach dem COND-Verfahren erfolgt analog zum DIN-Verfahren unter konstantem Klimabedingungen. Es können die Randbedingungen nach Tabelle 2.2 zur Anwendung kommen oder es kann auch ein beliebiges anderes konstantes Klima verwendet werden. Das ist z.B. bei Räumen mit besonderen Nutzungsanforderungen von Bedeutung, wenn mit höheren relativen Luftfeuchten oder Temperaturen gerechnet werden muss.

Das Verfahren nach Glaser liefert auf einfache Art und Weise die Menge des zu erwartenden Kondensats, ohne dabei jedoch die Ausbreitung des anfallenden Wassers durch kapillare Transportprozesse zu berücksichtigen. Kapillare Leitung kann deutlich zur hygrischen Entspannung der Konstruktion beitragen, wenn Materialien mit einer großen kapillaren Leitfähigkeit, z.B. eine Innendämmung aus kapillaraktivem Calciumsilikat, am Konstruktionsaufbau beteiligt sind. Die Berechnung mit dem Glaserschema würde dann eine unzulässig hohe Kondensatmenge liefern, obwohl sich die Feuchte in der Realität schnell innerhalb des Dämmmaterials verteilt und damit eine zügige Austrocknung begünstigt wird.

Die Berechnung des Temperaturprofils, der Dampfdruckprofile und der Kondensatmengen erfolgt im COND-Verfahren anders als im Glaser-Verfahren. Das COND-Verfahren berücksichtigt zusätzlich:

- eine kondensat- bzw. flüssigwasserabhängige Wärmeleitfähigkeit, um den Feuchteinfluss auf die Wärmedämmung zu quantifizieren,
- die hygroskopische Aufladung der Materialien, d.h. die Adsorption von Feuchte in den Mikroporen mit einer Feuchtespeicherfunktion und
- die schnellere Verdunstung durch Ausbreitung des Kondensats infolge kapillarer Leitung mit einer Flüssigwasserleitfunktion.

Das COND-Verfahren liefert damit eine realitätsnähere Kondensat- und Verdunstungsmenge als das Glaserschema.

Vereinfachungen für die analytische Lösung

Das COND-Verfahren beinhaltet aber auch einige notwendige Vereinfachungen, um eine analytische Lösung zu ermöglichen. Dazu werden

- eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von dem Feuchtegehalt vorausgesetzt,
- eine vereinfachte, linearisierte Sorptionsisotherme (schematischer Verlauf wie in Abbildung 2.3 dargestellt) definiert,
- eine konstante Dampfleitfähigkeit angenommen und
- eine linearisierte Funktion für den kapillaren Transport von Flüssigwasser (schematischer Verlauf wie in Abbildung 2.4 dargestellt) verwendet.

Weitere Einschränkungen resultieren aus den stationären Randbedingungen und der Wandgeometrie:

- Das Feuchtefeld bleibt konstant, die in die Konstruktion hinein- und hinaus-



strömenden Flüsse sind gleich groß.

- Es wird ein eindimensionaler Feuchtetransport angenommen, d.h. Wasserdampf und Kapillarwasser wird nur in x-Richtung geleitet.

Um den Feuchteinfluss auf die Wärmedämmung zu quantifizieren, muss eine Wärmeleitfähigkeitsfunktion $\lambda(w)$ in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt definiert werden. Gleichung (2.9) stellt eine lineare Funktion mit dem Parameter λ_R dar, die im COND-Algorithmus implementiert worden ist.

$$\lambda(w) = \begin{cases} \lambda_R & w < w_{95} \\ \lambda_R + 0,6 \cdot w & w \geq w_{95} \end{cases} \quad \text{in W/m}\cdot\text{K} \quad (2.9)$$

In obiger Gleichung (2.9) ist λ_R der feuchtebeaufschlagte Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes, wie er beispielsweise der DIN für Materialien mit einem praktischen Feuchtegehalt w_{80} entnommen werden kann. Im hygroskopischen Bereich wird mit einer konstanten Wärmeleitfähigkeit gerechnet. Tritt bei einer COND-Berechnung überhygroskopische Feuchte (Kondensat) im Wandquerschnitt auf, führt dies zu einer Neuberechnung der Wärmeleitfähigkeiten der Materialien sowie der Temperatur- und Feuchteprofile. Diese iterative Berechnung wird so lang fortgesetzt, bis die Änderung der Ergebnisse eine Toleranzschwelle unterschritten hat.

Die Feuchtespeicherfunktion hat üblicherweise einen Verlauf, der durch das Porensystem des Baustoffes bestimmt wird. Sie ist daher in dieser Form einer analytischen Lösung nicht zugänglich und wird deshalb im COND-Verfahren mit zwei Geradengleichungen nach Gleichung (2.10) angenähert. Damit werden die folgenden beiden Materialparameter eingeführt: der praktische Feuchtegehalt w_{80} bei einer relativen Luftfeuchte von 80% und der (effektive) Sättigungsfeuchtegehalt w_{eff} . Als Geradengleichung gilt für den gesamten Feuchtebereich (siehe Abbildung 2.3):

$$w(\varphi) = \begin{cases} w_{80} \cdot \frac{\varphi}{0,8} & 0 \leq \varphi \leq 95\% \\ \frac{w_{eff} - w_{95}}{\varphi - 0,95} \cdot (\varphi - 0,95) + w_{95} & 95\% \leq \varphi \leq 100\% \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\text{mit } w_{95} = w_{80} \cdot \frac{0,95}{0,8}$$

Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Approximation der Feuchtespeicherfunktion



2 Berechnungsverfahren

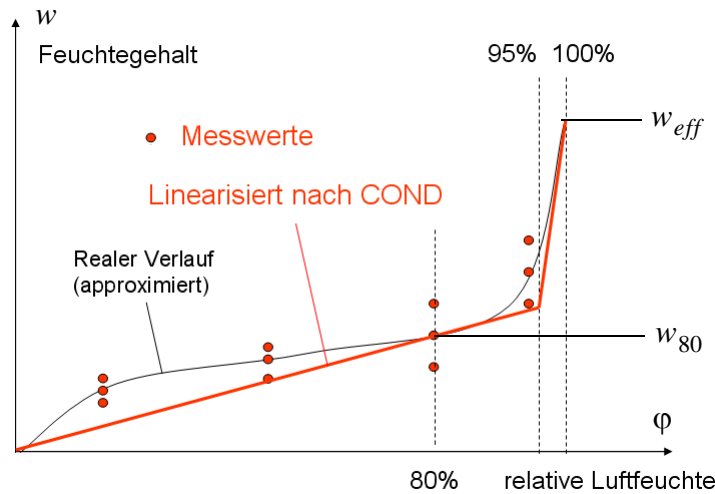


Abb. 2.3: Linearisierte Sorptionsisotherme

Feuchtetransport infolge Dampfdiffusion

Die Dampfdiffusionsstromdichte g_v im porösen Material hängt vom Dampfdruckgradienten innerhalb der Schicht und dem Dampfdiffusionskoeffizienten $D_v(\theta)$ des Materials sowie der spezifischen Gaskonstante R_v ab.

$$g_v = -\frac{D_v(\theta)}{R_v \cdot \theta} \cdot \frac{dp_v}{dx} \quad \text{Dampfdiffusionsstromdichte in kg/m}^2\cdot\text{h} \quad (2.11)$$

Die dimensionslose Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gibt das Verhältnis des Dampfdiffusionskoeffizienten in Luft $D_{v,air}(\theta)$ zu dem des Materials an.

$$\mu = \frac{D_{v,air}(\theta)}{D_v(\theta)} \quad \text{Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in -}$$

Definiert man die Dampfleitfähigkeit von Luft als temperaturunabhängige Konstante

$$\delta_{air} = \frac{D_{v,air}(\theta)}{R_v \cdot \theta} \cong 1,9 \times 10^{-10} \quad \text{Dampfleitfähigkeit von Luft in s}$$

ergibt sich die Dampfstromdichte im porösen Material zu

$$g_v = -\frac{\delta_{air}}{\mu} \cdot \frac{dp_v}{dx} \quad \text{Dampfstromdichte in kg/m}^2\cdot\text{s}$$

Feuchtetransport durch kapillare Leitung

Das Glaserschema basiert auf der konservativen Annahme, dass die Differenz zwischen den ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfmengen vollständig als Tauwasser in den betreffenden Schichten ausfällt. Wenn es sich um poröse Materialien handelt, stellt sich parallel zum Wasserdampftransport ein kapillarer Flüssigwassertransport ein, der die Ansammlung von Kondensat verzögert und



die Austrocknung beschleunigt. Berücksichtigt man diesen Effekt in den Gleichungen, erhält man eine Reduktion der Kondensatmenge. Konstruktionen, welche beim Glaserschema als kritisch eingestuft wurden, könnten sich durch diese genauere Betrachtungsweise als praktikabel herausstellen.

Generell kann man dabei für eine Schicht folgende Fälle unterscheiden:

1. Die Schicht ist lediglich hygroscopisch durchfeuchtet, Wasser wird hauptsächlich durch Dampfdiffusion übertragen.
2. Die Schicht ist teilweise überhygroscopisch durchfeuchtet, der Feuchtetransport durch Dampfdiffusion und kapillare Leitung überlagern sich.
3. Die Schicht ist vollständig überhygroscopisch durchfeuchtet, Dampfstrom und Kapillarwasserstrom überlagern sich.
4. Die Schicht ist teilweise gesättigt, im gesättigten Bereich findet keine Dampfdiffusion statt.
5. Die Schicht ist vollständig gesättigt, es findet keine Dampfdiffusion statt.

Wird eine Schicht teilweise überhygroscopisch durchfeuchtet, stellt sich zusätzlich zum Dampfstrom auch ein Kapillarwasserstrom ein. Es bildet sich in Abhängigkeit der Materialparameter ein Feuchteprofil aus, welches nach hinreichend langer Zeit in den stationären Zustand übergeht und dann konstant bleibt.

Die Flüssigwasserstromdichte g_l nach Gleichung (2.12) ist abhängig vom Gradienten des Feuchtegehalts und der Flüssigwasserdiffusivität des Materials $D_l(w)$:

$$g_l = -\rho_w D_l(w) \cdot \frac{dw}{dx} \quad \text{Kapillarwasserstromdichte in kg/m}^2\text{s} \quad (2.12)$$

ρ_w ist dabei die Dichte des Wassers.

Wenn die relative Luftfeuchte an keinem Punkt der Konstruktion $\varphi = 95\%$ erreicht, sind alle Schichten der Konstruktion hygroscopisch durchfeuchtet. Im hygroscopischen Feuchtebereich dominiert die Dampfdiffusion. Die kapillare Leitung ist im hygroscopischen Bereich dagegen klein und kann vernachlässigt werden. Die Flüssigwasserdiffusivität $D_l(w)$ wird daher unterhalb des Feuchtegehalts w_{95} als Null angenommen. Die Kapillarwasserstromdichten g_l sind demnach gleich Null. Im überhygroscopischen Bereich wird der Verlauf der Flüssigwasserdiffusivität vereinfachend als lineare Funktion angenähert (siehe Abbildung 2.4). Für die Flüssigwasserdiffusivität gilt also Gleichung (2.13) in den jeweiligen Bereichen.

$$D_l(w) = \begin{cases} 0 & 0 \leq w \leq w_{95} \\ k_w \cdot (w - w_{95}) & w_{95} \leq w \leq w_{eff} \end{cases} \quad (2.13)$$



2 Berechnungsverfahren

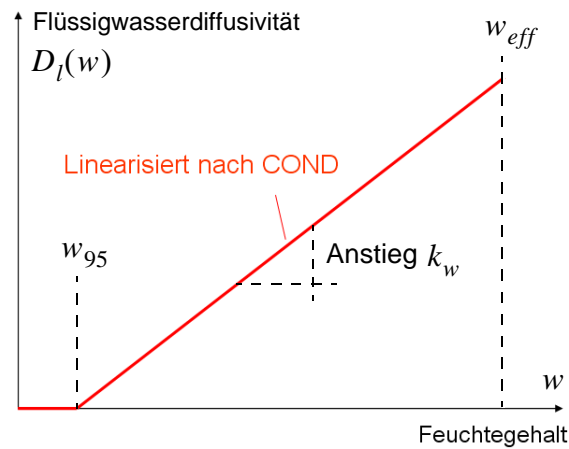


Abb. 2.4: Angenäherter Verlauf der Flüssigwasserdiffusivität

Dabei ist der Anstieg k_w ein Funktionsparameter, mit dem der Verlauf der Geraden angepasst werden kann. Die Steigung der Geraden wird aus dem Wasseraufnahmekoeffizient A_w und der Differenz zwischen Sättigungsgehalt w_{eff} und dem w_{95} -Wert berechnet (Nicolai 2002 und Häupl 2005). Die in (2.14) enthaltene Konstante 5×10^{-8} wurde durch Nachrechnung von Wasseraufnahmeexperimenten mehrerer Materialien mit Hilfe der Simulation und unter Verwendung von Gleichung (2.13) bestimmt.

$$k_w = 5 \times 10^{-8} \cdot \frac{A_w^2}{(w_{eff} - w_{95})^3} \quad (2.14)$$

Der A_w -Wert, auch als \bar{W}_w - (DIN EN ISO 15148) oder auch w -Wert (DIN V 18550) bezeichnet, wird durch ein Wasseraufnahmeexperiment bestimmt, bei dem die Unterseite einer trockenen Materialprobe dauerhaft mit Wasser benetzt wird. Er beschreibt die zeitabhängige Feuchteaufnahme des Probekörpers bei Wasserkontakt.

Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungs- menge

Geht man davon aus, dass zu Beginn der Kondensationsperiode in der Kondensationsebene die Luftfeuchte noch nicht 100% erreicht hat, so kommt es noch nicht sofort zur Kondensation. Durch Dampfdiffusion erhöht sich der Feuchtegehalt in allen Schichten, bis in der Kondensationsebene 100% Luftfeuchte erreicht wurde. Durch den vereinfachten, linearen Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und relativer Luftfeuchte bzw. Dampfdruck nach Gleichung (2.10) lässt sich diese Erhöhung des Feuchtegehaltes auch durch die Änderung des Dampfdruckprofils beschreiben. Diese Feuchtemenge wird innerhalb einer hygroskopischen Einstellzeit durch Dampfdiffusion in die Konstruktion transportiert.

In der Regel wird es von Interesse sein, die entstandene Kondensatmenge in der Konstruktion nach Ablauf einer gewählten Zeitspanne t_T zu beurteilen, während der ein konstantes Winterklima anliegt. Unter der Annahme, dass die Schichten



zu Beginn der Klimaperiode noch nicht durchfeuchtet (trocken) sind, wird die Konstruktion zunächst hygroskopisch aufgesättigt. Danach wird die Konstruktion im Kondensationsbereich nach und nach überhygroskopisch durchfeuchtet bis nach hinreichend langer Zeit ein stationärer Endzustand eintritt. Beschreibt man die Dynamik des Feuchtestransportes durch eine parabolische Differentialgleichung mit Speicher- und Transporttermen als Anfangs- und Randwertproblem, so erhält man die stationäre Lösung durch Nullsetzen des Speicherterms. Unter dieser Voraussetzung läßt sich die Menge des Kondensats $m_{W,T,\infty}$ in kg/m^2 nach theoretisch unendlich langer Zeit bestimmen.

Von Interesse ist aber der Kondensationsfortschritt nach Ablauf der Zeitspanne t_T . COND berechnet daher die zu erwartende Kondensatmenge nach einer exponentiellen Aufladefunktion in Abhängigkeit der Zeit, welche den Feuchtezu- und -abtransport durch kapillare Leitung und Dampfdiffusion durch den Term $\Delta(g_l + g_v)$ in Gleichung (2.15) berücksichtigt.

$$m_{W,T}(t_T) = \left(1 - e^{-\frac{\Delta(g_l + g_v)}{m_{W,T,\infty}} \cdot t_T} \right) \cdot m_{W,T,\infty} \quad (2.15)$$

Die COND-Berechnung liefert durch die Berücksichtigung des kapillaren Flüssigwassertransports eine im Vergleich zum Glaserschema kleinere Kondensatmenge. Damit steht ein Verfahren zur Verfügung, die Begrenzung der anfallenden Kondensatmenge durch die kapillaren Eigenschaften der Konstruktion nachzuweisen, auch wenn diese bei einer vergleichsweisen Berechnung nach dem Glaserschema als nicht zulässig einzustufen wäre.

Der die Austrocknung beschleunigende Effekt der kapillaren Trocknung kann in der Verdunstungsperiode auch mit berücksichtigt werden; er wird jedoch bei fortschreitender Austrocknung und dem damit abnehmenden Feuchtegradienten stets kleiner. Die Flüssigwasserstromdichte wird sehr schnell klein gegenüber der Dampfstromdichte und trägt somit nur sehr wenig zum Trocknungsprozess bei. Daher kann dieser Effekt im Allgemeinen vernachlässigt werden. Da sich die Zeit zum Austrocknen der Konstruktion rechnerisch verlängert, liefert die Berechnung ohne kapillare Trocknung stets eine auf der sicheren Seite liegende Aussage.

$$m_{W,T} = (g_{v,i} + g_{v,e}) \cdot t_V \quad (2.16)$$

Die Verdunstungsperiode wird analog zum Glaser-Verfahren mit $t_V = 90d$ angesetzt. Der Trocknungsvorgang wird damit im Sinne des Glaserverfahrens bewertet werden.



2 Berechnungsverfahren

2.4 Simulationsprogramm DELPHIN

2.4.1 Einführung

Die Modellierung der physikalischen Prozesse und die Entwicklung der modernen Rechentechnik erlauben es, mittels Feuchte- und Wärmetransportprozessen aus Software-Simulationsrechnungen quantitative Aussagen zum hygrothermischen Verhalten von Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen zu treffen. Das Programm DELPHIN 4 (*Grunewald 1997*) wurde beispielsweise zur Entwicklung der kapillaraktiven Innendämmung von Fassaden erhaltenswürdiger historischer Bauwerke eingesetzt (Forschungsprojekt INSUMAT im 5. Rahmenprogramm der EU, *Grunewald et al. 2004*). Die neuere Version DELPHIN 5 (*Nicolai 2007*) wurde, basierend auf der Vorgängerversion DELPHIN 4, seit 2002 kontinuierlich verbessert und erweitert. Zur Simulation der Konstruktionen im Feuchteatlas-Projekt fanden beide Versionen Anwendung, daher wird im Weiteren nicht explizit nach Versionen unterschieden.

Was berechnet DELPHIN?

Das DELPHIN-Programm verwendet das Modell des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransports in kapillarporösen Baustoffen. Das bedeutet, es lassen sich die folgenden Transportprozesse durch die Lösung von Bilanzgleichungen numerisch analysieren:

- **Wärmetransport** durch Bauteile und in Konstruktionsdetails (z.B. Wandaufbauten, Wärmebrücken, Anschlussdetails),
- **Feuchtetransport** (Flüssigkeits- und Dampftransport) sowie Feuchtespeicherung in Konstruktionen zum Nachweis der Dauerhaftigkeit (Vermeidung von Feuchteschäden etc.), DELPHIN 5 enthält auch ein Modell zur Berechnung des Salztransportes und der Salzkristallisation,
- **Lufttransport** (Strömung feuchter und warmer Luft durch offenporige Bauteile und Undichtigkeiten, Kondensation in kälteren Zonen).

Die Rechnungen können eindimensional erfolgen (z.B. zur Analyse eines ungestörten Wandquerschnittes), aber auch zweidimensionale Schnitte durch Konstruktionsdetails können überprüft werden. Damit lassen sich z.B. die Auswirkungen von Wärmebrücken auf das Feuchteverhalten an Fensteranschlüssen bewerten. Für radialsymmetrische Geometrien und Randbedingungen sind auch dreidimensionale Berechnungen möglich. Die Berechnungen erfolgen orts aufgelöst, d.h. durch Diskretisierung wird ein Netz von Volumenelementen erzeugt. Während der Simulation werden die Zustandsvariablen Temperatur, Wassergehalt und Luftdruck von jedem Volumenelement für jeden Zeitschritt neu ermittelt. Daraus lassen sich alle hygrothermisch relevanten Größen, wie Feuchte- und Wärmeströme, als integrale Werte und Einzelgrößen bestimmen.

In der Berechnung werden natürliche Klimabedingungen in detaillierter Form zu Grunde gelegt, d.h. die Klimakomponenten



- Temperatur, relative Luftfeuchte,
- Sonneneinstrahlung (Licht- und Wärmestrahlung) und
- Niederschlag, Windrichtung und -geschwindigkeit

kommen als Jahresverläufe auf Stundenbasis zur Anwendung. Natürlich können auch DIN-Referenzbedingungen oder beliebige selbstdefinierte Klimabedingungen angelegt werden. Die Klimadatensätze werden normalerweise in Form von Testreferenzjahren (TRY) bereitgestellt, die dann zyklisch Anwendung finden können. Testreferenzjahre sind Daten einer Klimazone, die aus einem längeren Beobachtungszeitraum zu einem für die betreffende Klimazone charakteristischen Jahr zusammengestellt wurden.

Das DELPHIN Simulationsprogramm ist vorrangig ein Werkzeug für die Forschung und die Lehre. DELPHIN wird weltweit von Forschungsinstituten für Berechnungen von unterschiedlichsten hygrothermischen Problemstellungen verwendet. Das thermodynamische State-of-the-Art-Modell, das der Berechnung zugrunde liegt, und die freie Einstellbarkeit praktisch aller physikalischen Parameter und Randbedingungen machen das Programm auch für den spezialisierten Bauphysiker und für die Ausbildung junger Ingenieure und Architekten geeignet.

Das DELPHIN-Programmpaket besteht aus einem Nutzerinterface (Eingabeoberfläche), einem Solver (Berechnungsmodul) und einem Postprocessing-Werkzeug zur Visualisierung der Ergebnisdaten. Angeschlossen sind Datenbanken für Klima- und Materialdatensätze. Die interaktive Projekterstellung ermöglicht eine schnelle Generierung der zu berechnenden Konstruktion und eine Definition sowie die Zuordnung der Datensätze für Randbedingungen und Materialien. Klimadatensätze und Materialdatensätze können aus den Datenbanken importiert werden.

Die Grafikausgabe erlaubt die Darstellung der Ergebnisse mit nützlichen, anschaulichen Funktionen wie zweidimensionalen farbigen Image- und Konturplots, Orts- und Zeitschnitten und einer Nach- und Weiterbearbeitung der Daten. Physikalische Einheiten, Achsenskalierungen, beliebige Wahl der Darstellungsausschnitte etc. sind integriert. Auch eine zeitaufgelöste Darstellung als Film und Export von Grafikformaten zur Einbettung in andere Programme (Textverarbeitung o.ä.) sind möglich. Die grafische Auswertung der Ergebnisse kann sowohl während der Berechnung als auch nachträglich erfolgen.

Die Materialeigenschaften werden in DELPHIN als Materialfunktionen berücksichtigt. In der Materialdatenbank sind Daten enthalten, die am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor gemessen wurden. Enthalten sind gängige Massiv- und Holzbaustoffe, Mörtel, Dämmstoffe, Abdichtungs- und Oberflächensysteme.

Wer benutzt das Programm?

Programmkomponenten



2 Berechnungsverfahren

Bilanzgleichungen und numerische Lösung

2.4.2 Theoretische Grundlagen

Die dem Programm DELPHIN zugrunde liegende Theorie ist abgeleitet von thermodynamischen Prinzipien, welche die Speicher- und Transportprozesse sowie die Übergänge zwischen den Phasen (flüssig und gasförmig) beschreiben. Das Modell beinhaltet den porösen Baustoff selbst, die flüssige Phase mit absorbierbarem Wasser und die gasförmige Phase, bestehend aus einem Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf. Dabei werden die Bilanzgleichungen für flüssiges und gasförmiges Wasser addiert und man erhält eine Feuchtemassenbilanz, die durch eine Bilanz der inneren Energie und eine Luftmassenbilanz komplettiert wird. Daraus ergibt sich ein System von parabolischen Differentialgleichungen, aus dessen Lösung die instationären Variablen Wassergehalt, Temperatur und Gasdruck als Zustandsfelder berechnet werden.

Die numerische Lösung des parabolischen Differentialgleichungssystems beginnt mit der Semidiskretisierung des Ortes. Nach Vorgabe der Anfangswerte und Randbedingungen erfolgt die zeitliche Integration mit Hilfe geeigneter mathematischer Solver (CVODE, *Cohen und Hindmarsh, 1996*), wobei verschiedene Mehrschrittverfahren zum Einsatz kommen.

Vereinfachungen und Einschränkungen

Obwohl das DELPHIN-Modell als sehr detailliert bezeichnet werden kann, beinhaltet es eine Reihe von Idealisierungen, wodurch sich das ursprüngliche Modell erheblich vereinfachen lässt.

Untergeordnete Effekte, die vernachlässigt werden:

- Thermodiffusion, Diffusionsthermik (Dufour und Soret-Effekte) und die Produktion innerer Energie infolge Kompression und Reibung,
- Wirkung elektrischer Felder (Schwerkraft wirkt als einzige Volumenkraft),
- turbulente Strömungen, die Flüssigphase (Kapillarwasser) und die Gasphase bewegen sich ausschließlich laminar durch das Porensystem,
- zeitliche Änderung des Luftdruckfeldes innerhalb eines vorgebbaren Zeitschrittes (Größenordnung 1-10 min), der Luftdruckausgleich in der Gasphase vollzieht sich so schnell, dass eine stationäre Lösung des Druckfeldes innerhalb dieses Zeitschrittes hinreichende Genauigkeit liefert.

Einschränkungen, dem Stand der Modellentwicklung entsprechend:

- es sind nur laminare Luftströmungen durch Hohlräume (Fugen, Spalten, baukonstruktive kleinere Lufthohlräume) zugelassen,
- zwischen den Phasen herrscht in jedem diskretisierten Volumenelement thermodynamisches Gleichgewicht, d.h. gleiche Temperatur (z.B. bei Durchströmung), gleicher Druck und Verdunstungsgleichgewicht,
- die Hysterese der Feuchtespeicherfunktion wird vernachlässigt,
- die Materialeigenschaften sind in jedem diskretisierten Volumenelement homogen,
- die Transporteigenschaften sind isotrop, keine Richtungsabhängigkeit.

Die Einschränkungen, besonders die letzten drei mit Bezug auf die Materialei-



genschaften, müssen als relevant eingestuft werden und sind derzeit Gegenstand der Forschung. Die Implementierung geeigneter Modelle ist geplant beziehungsweise wird daran gearbeitet.

Das System der Bilanzgleichungen (*Grunewald & Häupl 2003*) wird durch konstitutive Gleichungen ergänzt, welche die konvektiven und diffusiven Flüsse mit den Gradienten der Zustandsvariablen (Konzentrationen, Drücke und Temperaturen) mittels Transportkoeffizienten verknüpfen. Die konstitutiven Gleichungen (2.17) bis (2.20) sind als Definitionsgleichungen der Transportkoeffizienten anzusehen. Die Gradienten der Zustandsvariablen sind den Flüssen als thermodynamische Kräfte zugeordnet. Die additiven Dichteterme beschreiben die Wirkung der Schwerkraft auf die Flüssig- und Gasphase. Eine Ableitung dieser Zuordnungen kann auf phänomenologischem Wege erfolgen, indem man den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik mit der GIBBS-schen Fundamentalgleichung für alle beteiligten Phasen des Systems verknüpft (*Grunewald 1997*). Die Symbolik folgt im Weiteren der Nomenklatur in (*Bear & Bachmat 1991*), da diese auf die Beschreibung von Multiphasensystemen ausgelegt ist:

Transportkoeffizienten

$$\begin{aligned} j_{k, conv}^{m_l} &= -K_l(\theta_l) \left[\frac{\partial p_l}{\partial x_k} + \rho_l g_k \right] && \text{Flüssigwassertransport} \\ & && \text{(Kapillardruckmodell)} \\ &= -\rho_l D_l(\theta_l) \left[\frac{\partial \theta_l}{\partial x_k} \right] && \text{(Diffusionsmodell)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$j_{k, diff}^{m_v} = -\frac{D_v(\theta_l, I) \rho_v}{R_v T} \frac{\partial p_v}{\partial x_k} \quad \text{Dampfdiffusion} \quad (2.18)$$

$$j_{k, conv}^{m_g} = -K_g(\theta_l) \left[\frac{\partial p_g}{\partial x_k} + \rho_g g_k \right] \quad \text{Luftströmung} \quad (2.19)$$

$$j_{k, diff}^Q = -\lambda(\theta_l) \frac{\partial I}{\partial x_k} \quad \text{Wärmeleitung} \quad (2.20)$$

p_l	Druck in Flüssigphase in Pa
p_v	Wasserdampfpartialdruck in Pa
p_g	Wasserdampfpartialdruck in Pa
T	Temperatur in K
R_v	Spezifische Gaskonstante Wasserdampf in J/kgK
θ_l	Volumetrischer Wassergehalt in m^3/m^3
ρ_l	Dichte der Flüssigphase in kg/m^3
ρ_g	Dichte der Gasphase in kg/m^3
g_k	Gravitationskonstante in m/s^2



2 Berechnungsverfahren

x_k Ortskoordinaten ($x_1=x$, $x_2=y$, $x_3=z$) in m

Die Transportkoeffizienten lauten dann:

$K_l(\theta_l)$ Flüssigwasserleitfähigkeit in s

$D_l(\theta_l)$ Flüssigwasserdiffusivität in m^2/s

$D_v(\theta_p, T)$ Wasserdampfdiffusionskoeffizient in m^2/s

$K_g(\theta_l)$ Gaspermeabilität in s

$\lambda(\theta_l)$ Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Die Transportkoeffizienten werden als feuchteabhängige Materialfunktionen aufgefasst. Sie werden durch Anwendung eines Materialmodells aus den im Labor messbaren Größen abgeleitet und mit Hilfe von Laborexperimenten kalibriert. Die Feuchtespeicherfunktion komplettiert das Set der Materialfunktionen.

2.4.3 Materialfunktionen und -parameter

Feuchte- speicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion ist eine zentrale Materialfunktion, die aus der Kombination von Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve dargestellt werden kann (siehe Abbildung 3.8). Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt die Speicherung von Wasser im kapillarporösen Material in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bzw. dem Kapillardruck.

Die Feuchtespeicherfunktion steht mit der Porenvolumenverteilungskurve, dem „Fingerabdruck“ des Materials, in enger Beziehung (Abbildung 2.5 oben). Es ist zweckmäßig, die mathematische Formulierung der Feuchtespeicherfunktion aus der Porenvolumenverteilungskurve abzuleiten. Eine passende analytische Form der differentiellen Porenvolumenverteilungskurve, die sich leicht an Messwerte approximieren lässt, ist durch Gleichung (2.21) gegeben. Dazu werden GAUSS-normalverteilte Porenvolumina auf der logarithmischen Radius-Skala vorausgesetzt. Eine schematische Darstellung der differentiellen und integralen Porenvolumenverteilungskurve und eine Deutung der Formparameter sind in Abbildung 2.5 gegeben.

$$\frac{d\theta}{d\log(R)}(R) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{W_k}{\sqrt{2\pi}S_k} \exp\left(-\frac{[\log(R) - \log(R_k)]^2}{2 \cdot S_k^2}\right) \right] \quad (2.21)$$

N Modalität (Anzahl der Peaks im Porenspektrum)

θ Porenvolumen (bezogen auf Gesamtvolumen) in m^3/m^3

R Äquivalenter Porenradius in m

W_k, S_k, R_k Formparameter zur Approximation von Messwerten



$$\theta_l(p_c) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{W_k}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{pC_k - pC}{\sqrt{2}S_k} \right) \right) \right] \quad (2.22)$$

mit $pC = \log(p_c) = \log(2\sigma_l) - \log(R)$

$$\theta_{eff} = \sum_{k=1}^N \theta_k \quad \text{und} \quad \theta_k = W_k \cdot \theta_{eff}$$

Die Feuchtespeicherfunktion (2.22) erhält man durch Integration obiger Gleichung (2.21) über den gesamten Porenbereich. Dem liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sich das Porenvolumen bei Anlegen des Druckgleichgewichts sukzessive mit Wasser füllt (der volumetrische Wassergehalt θ_l tritt an die Stelle des Porenvolumens θ). Dabei füllen sich zuerst die kleinsten Poren und danach schrittweise immer größere. Der Betrag der Kapillarspannung p_c nimmt mit zunehmendem Porenradius R ab. Die Beziehung zwischen Kapillarspannung und Porenradius lässt sich mit Hilfe eines Kräftegleichgewichts am Kapillarmeniskus und der Oberflächenspannung des Wassers σ_l ableiten.

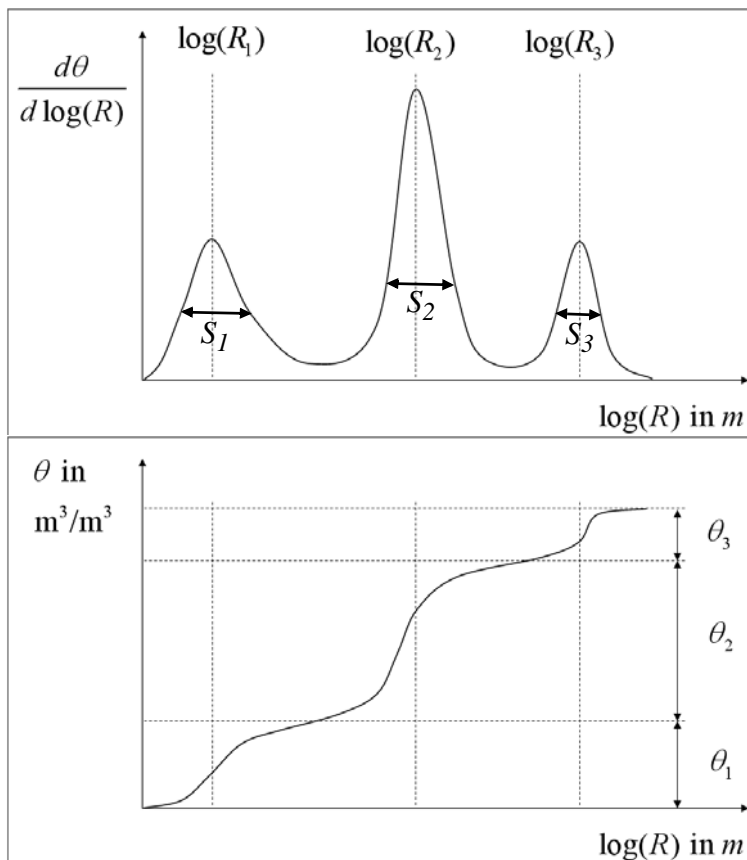


Abb. 2.5: Schematische Darstellung einer dreimodalen differentiellen und integralen Porenvolumenverteilungskurve und ihrer eingehenden Formparameter; oben die drei Porenmaxima R_1 bis R_3 , übliche Baustoffe besitzen ein bis zwei Maxima



2 Berechnungsverfahren

Effektive und kapillare Sättigung

Den Zusammenhang zwischen Feuchtespeicherfunktion und Porenvolumenverteilungsfunktion stellen zwei charakteristische Parameter her, die experimentell bestimmt werden müssen:

- Die effektive Sättigung θ_{eff} bezeichnet das Porenvolumen, das ohne Einsatz von destruktivem Druck mit Flüssigwasser gefüllt werden kann. Geschlossene Poren, die nicht im Austausch mit der Umgebung stehen, sind davon ausgeschlossen.
- Die kapillare Wassersättigung θ_{cap} wird durch kurzzeitige druckfreie Wasseraufnahme (kapillares Saugen) bestimmt. Die kapillare Wassersättigung markiert das Ende der ersten intensiven Phase des Wasseraufnahmeexperiments (s. u. Wasseraufnahmekoeffizient und Sättigungsleitfähigkeit).

Da Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge unterschiedlich ablaufen können, kann man bei der Feuchtespeicherfunktion zwischen einer Befeuchtungs- und einer Trocknungskurve unterscheiden. Da eingangs Hysterese als Prozess ausgeschlossen wurde, wird hier vorausgesetzt, dass Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge nach einer einheitlichen Feuchtespeicherfunktion ablaufen. Damit sich die Ergebnisse der Simulationen auf der sicheren Seite befinden, wurde in den Berechnungen die Desorptionskurve verwendet. So wird immer mit dem maximalen Feuchtegehalt, und damit auch mit der maximalen Feuchtemenge gerechnet.

Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion erfolgt im bauphysikalischen Labor. Dabei kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz, um den gesamten Feuchtebereich erfassen zu können (Abbildung 2.6). Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich im Regelfall aus mehreren Messpunkten im hygroskopischen Bereich (Sorptionisotherme oder Feuchtespeicherisotherme bis ca. 95% relativer Luftfeuchte, siehe *DIN EN ISO 12571*) und im überhygroskopischen Bereich (Saugspannungskurve ab ca. 95% relativer Luftfeuchte, siehe *DIN ISO 11274*) zusammen.



Abb. 2.6: Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion (links: Exsikkatoren zur Messung der Sorptionsisotherme, rechts: Druckplattenapparate zur Bestimmung der Saugspannungskurve) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor der TU Dresden



In verschiedenen Wissenschaftsgebieten – wie in der Hydrodynamik, der Bodenkunde und auch in der Bauphysik – wird die differentielle Porenvolumenverteilung benutzt, um die Flüssigwasserleitfähigkeit $K_l(\theta_l)$ poröser Stoffe in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Porenstruktur zu berechnen. In einer Reihe von wissenschaftlichen Beiträgen wurden Porenmodelle veröffentlicht (*Burdine 1953, Mualem 1976, Neiß 1982 und Carmeliet & Roels 2001*), die sich im Wesentlichen durch die verwendete Porengeometrie und die Kopplungsbedingungen zwischen unterschiedlichen Porenklassen unterscheiden.

Flüssigwasserleitfähigkeit

Die Verwendung der differentiellen Porenvolumenverteilung (PVV) führt oft zu einer Überschätzung, manchmal auch zu einer Unterschätzung der gesuchten Flüssigwasserleitfähigkeit. Es ist deshalb vorteilhaft, die aus dem Modell abgeleitete Leitfähigkeit $K_{l,PVV}(\theta_l)$ bei kapillarer Sättigung zu normieren und damit eine relative Flüssigwasserleitfähigkeit $K_{l,rel}(\theta_l)$ zu definieren. Der verbleibende Fehler ist durch die Nach-Simulation geeigneter Laborexperimente und Anpassung von offenen Parametern zu minimieren (Kalibrierung des Materialmodells, *Scheffler 2008*).

$$K_{l,rel}(\theta_l) = \frac{K_{l,PVV}(\theta_l)}{K_{l,PVV}(\theta_{cap})} \quad (2.23)$$

Die Kurve der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit wird dann mit dem experimentell bestimmten Wert der Flüssigwasserleitfähigkeit bei kapillarer Sättigung (Sättigungsleitfähigkeit) $K_{cap} = K_l(\theta_{cap})$ multipliziert und man erhält die Funktion der Flüssigwasserleitfähigkeit (2.24) nach dem Kapillardruckgradientenmodell.

$$K_l(\theta_l) = K_{l,rel}(\theta_l) \cdot K_{cap} \quad (2.24)$$

Der Wasseraufnahmekoeffizient A_w (*DIN 15148*) ist der Anstieg der Kurve der kapillaren Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit während der ersten intensiven Phase des Wasseraufnahmeexperiments.

Wasseraufnahmekoeffizient

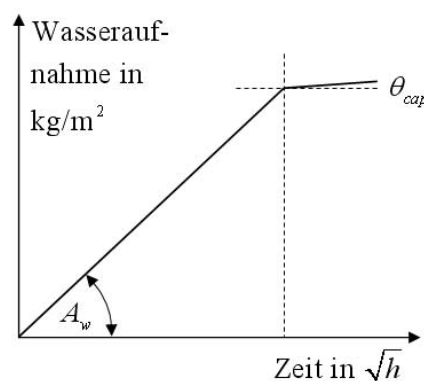


Abb. 2.7: Automatisierte Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (links: Probenhalter mit Waage, rechts: schematischer Kurvenverlauf) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor



2 Berechnungsverfahren

Sättigungsleitfähigkeit

Die experimentelle Bestimmung der Sättigungsleitfähigkeit erfolgt mit Hilfe des Wasseraufnahmekoeffizienten A_w . Es liegt nahe, dass sich ein funktionaler Zusammenhang zwischen Sättigungsleitfähigkeit und dem Wasseraufnahmekoeffizienten darstellen lässt, der in recht einfacher Form geschrieben werden kann.

$$K_{cap} = k_w \cdot A_w^2 \quad (2.25)$$

A_w Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$
 k_w interner Parameter, materialabhängig, wird durch Simulation des Wasseraufnahmeexperiments bestimmt

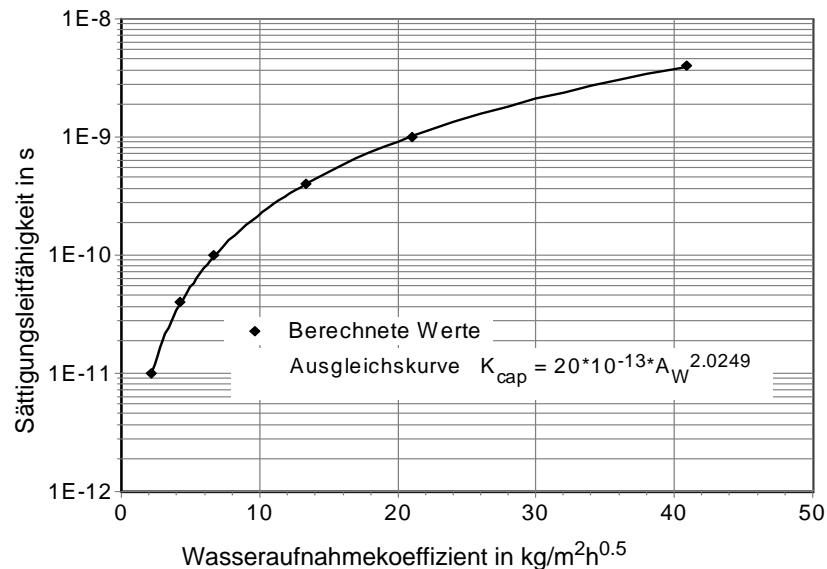


Abb. 2.8: Zusammenhang zwischen Sättigungsleitfähigkeit und Wasseraufnahmekoeffizient für ein Testmaterial

Die Beziehung nach Gleichung (2.25) konnte durch numerische Simulation bestätigt werden, wobei das Wasseraufnahmeexperiment für mehrere unterschiedliche Materialien mit verschiedenen Sättigungsleitfähigkeiten über einem realistischen Wertebereich simuliert wurde. Aus den resultierenden Wasseraufnahmekurven wurden die Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt. Die Ausgleichskurve ist für ein Material in Abbildung 2.8 beispielhaft dargestellt.

Flüssigwasserdiffusivität

Formal lässt sich die Flüssigwasserdiffusivität aus der Flüssigwasserleitfähigkeit ableiten, was unter Vernachlässigung der Schwerkraft und des Luftdruckeinflusses allerdings die Kenntnis der Ableitung der Umkehrfunktion der Feuchtespeicherfunktion notwendig macht.

$$\rho_l \cdot D_l(\theta_l) = \frac{\partial p_c}{\partial \theta_l} K_l(\theta_l) \quad (2.26)$$



Die Ableitung lässt sich nur als eindeutige Funktion definieren, wenn die Originalfunktion eindeutig ist. Das ist der Fall, wenn Hysterese ausgeschlossen wird. Mit einer prozessabhängigen Feuchtespeicherfunktion lässt sich keine Beziehung zwischen Flüssigwasserdiffusivität und Flüssigwasserleitfähigkeit mehr herstellen. Deshalb erfolgt die Bestimmung der Flüssigwasserdiffusivität ebenfalls mit Hilfe des Wasseraufnahmeexperiments und durch Anpassung mit analytischen Funktionsansätzen (*Künzel 1994, Scheffler 2008*).

Die Diffusion von Wasserdampf in einem kapillarporösen Material bei Ausgleichsfeuchte unterscheidet man von der Diffusion von Wasserdampf in Luft durch die Einführung des Diffusionswiderstandsfaktors μ_{dry} , den das Material durch seine Porenwindungen und -verengungen mit sich bringt und durch die Feuchteabhängigkeit des Dampfdiffusionskoeffizienten.

$$D_v(\theta_p, T) = \frac{D_{v, air}(T)}{\mu_{dry}} \cdot \frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}} \quad (2.27)$$

$D_{v, air}(T)$ Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft in m^2/s als temperaturabhängige Funktion nach *Schirmer 1938*

$\frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}}$ Lineare Abnahme des Dampfdiffusionsflusses mit zunehmendem Feuchtegehalt nach dem Parallelmodell *Grunewald & Häupl 2002*

Der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ_{dry} des Materials erfasst den Einfluss von Porosität und Tortuosität des Materials und wird bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 25% gemessen. Ein trockenes Material hat einen μ_{dry} -mal höheren Dampfdiffusionswiderstand als ruhende Luft.

Obiger Gleichung (2.27) liegt die Annahme einer Adsorbatschicht mit höherer Bindungsenergie (nicht-gefrierbares Wasser) zu Grunde. Diese Schicht ist fest an die Oberfläche gebunden. Im Gegensatz dazu ist die multimolekulare Belegung der Porenwände bei höheren Feuchtegehalten relativ leicht beweglich. Der Übergang von mono- zu multimolekularer Belegung der Porenwände findet bei ca. 20 - 30% relativer Luftfeuchte statt.

Bei höheren relativen Umgebungsluftfeuchten erhöht sich auch nach hinreichend langer Zeit die relative Luftfeuchte im luftgefüllten Teil des Porensystems, bis sie gleich der Umgebungsluftfeuchte ist. Es findet in den Poren Kapillarkondensation statt, d.h. es kondensiert Wasserdampf und bildet, in den Mikroporen beginnend, Flüssigwasserinseln. Bei weiterer Erhöhung der relativen Luftfeuchte vergrößern sich die Flüssigkeitsinseln und können dadurch eine zusammenhängende Flüssigphase bilden. Dann dominiert der kapillare Flüssigkeitstransport und die Dampfdiffusion nimmt mit zunehmendem Flüssigkeitsgehalt durch Reduktion des zur Verfügung stehenden Diffusionsquerschnittes ab.

Wasserdampfdiffusionskoeffizient

Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor



2 Berechnungsverfahren



Abb. 2.9: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionskoeffizienten (links: Behälter zur Probeninstallation im Klimaschrank, rechts: Klimaschränke) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor

Luftpermeabilität

Die Strömung von Luft durch ein kapillarporöses Material wird mit Hilfe der wasserhaltsabhängigen Permeabilitätsfunktion beschrieben. Der Parameter $K_{g, dry}$ gibt die Gaspermeabilität des trockenen Materials an und wird durch die Porosität des Materials bestimmt.

$$K_g(\theta_l) = K_{g, dry} \cdot \frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}} \quad (2.28)$$

$$\frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}}$$

Lineare Abnahme des Luftmassenstroms mit zunehmendem Feuchtegehalt

Luftpermeabilitätskoeffizient

Der Luftpermeabilitätskoeffizient $K_{g, dry}$ erfasst beim Anlegen einer Luftdruckdifferenz die Luftdurchlässigkeit des trockenen Materials. Er kann mit Hilfe eines Perm-Porometers gemessen werden, welches den Durchfluss als Funktion der anliegenden Druckdifferenz bestimmt.



Abb. 2.10: Bestimmung des Luftpermeabilitätskoeffizienten durch ein Perm-Porometer am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor



Die Gleichung (2.28) geht von der Annahme aus, dass sich der Luftvolumenstrom durch das Porensystem proportional zur aufgetragenen Druckdifferenz verhält. Diese Annahme konnte durch Messungen im Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des IBK weitgehend bestätigt werden. Lediglich für kleine Druckdifferenzen wurde eine Abweichung vom linearen Gesetz festgestellt.

Der Transport von Wärme in einem kapillarporösen Baustoff kann verschiedene physikalische Ursachen haben. Dazu zählen die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung, durch Strahlung (langwellig) und der Enthalpietransport (Latentwärme und sensible Wärme). Der Enthalpietransport wird im Modell als separater Fluss beschrieben, benötigt daher keinen eigenen Transportkoeffizienten. Die Wärmeleitungs- und Strahlungsvorgänge werden durch die Wärmeleitfähigkeitsfunktion $\lambda(\theta_l)$ erfasst, welche die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitung beschreibt. Gleichung (2.29) ist unter der Voraussetzung gültig, dass sich die Wärmeströme durch die Feststoffmatrix und durch den Porenraum (gasgefüllt oder wassergefüllt) als parallele Ströme modellieren lassen. Ersetzt man im Porensystem zunehmend Luft durch Wasser, ergibt sich damit eine lineare Funktion mit den beiden Parametern λ_{dry} und λ_l .

Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes λ_{dry} schließt alle Wärmetransportprozesse ein, die dem Temperaturgradienten folgen. Dazu gehören die Wärmeleitung im Feststoff und in der Gasphase, ein konvektiver Anteil durch Luftbewegung in geschlossenen Poren sowie der Anteil der inneren Wärmestrahlung.

$$\lambda(\theta_l) = \lambda_{dry} + \lambda_l \cdot \theta_l \quad (2.29)$$

λ_l Feuchteabhängiger Anstieg der Wärmeleitfunktion in W/(mK), entspricht der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigphase. Wenn die Flüssigphase nur aus Wasser besteht, ist $\lambda_l = 0,6$ W/mK

In obiger Gleichung (2.29) stellt λ_{dry} den Wärmeleitfähigkeitswert dar, wie er beispielsweise mit Hilfe einer Plattenapparatur (Abbildung 2.11) bestimmt werden kann. In der Praxis werden dagegen feuchtebeaufschlagte Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit λ_R verwendet, die auch in den einschlägigen Normen verzeichnet sind. Für die Anwendung von λ_R -Werten in der Simulation sind zumindest für Dämmstoffe die λ_R -Werte auf die λ_{dry} -Werte umzurechnen. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Zuordnung eines Feuchtegehalts zum λ_R -Wert. Dafür bietet sich der praktische Feuchtegehalt bei einer relativen Luftfeuchte von 80% an: $\lambda(\theta_l = \theta_{80}) = \lambda_R$.

$$\lambda_{dry} = \lambda_R - \lambda_l \cdot \theta_{80} \quad (2.30)$$

Wärmeleitfähigkeit

Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes



2 Berechnungsverfahren

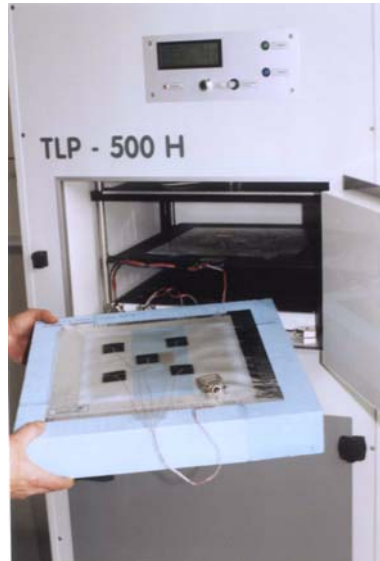


Abb. 2.11: Technologie zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Foto: FH Lausitz)

2.4.4 Kalibrierung des DELPHIN-Materialmodells

Die oben definierten Basismaterialparameter des DELPHIN-Modells sind:

- die effektive Sättigung θ_{eff} ,
- die kapillare Wassersättigung θ_{cap} ,
- der Wasseraufnahmekoeffizient A_w ,
- der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ_{dry} ,
- der Gaspermeabilitätskoeffizient K_g und
- die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes λ_{dry} .

Um das Set zu komplettieren, kommen noch hinzu:

- die Rohdichte ρ und
- die spezifische Wärmekapazität c .

Stehen alle Basismaterialparameter des DELPHIN-Materialmodells zur Verfügung, können die Materialfunktionen für die Transport- und Speichervorgänge generiert werden. Diese Prozedur wird als Kalibrierung des Materialmodells bezeichnet und umfasst folgende Teilschritte:

1. Approximation der gemessenen Feuchtegehalte der Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve durch die multimodale GAUSS-Funktion nach Gleichung (2.22),
2. Simulation des Wasseraufnahmeexperimentes zur Bestimmung des internen Parameters k_w nach Gleichung (2.25),
3. Simulation des Trocknungsexperimentes unter Einbezug zusätzlicher μ -Werte (wenn gemessen) zur Feinjustierung der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit nach Gleichung (2.23) im ungesättigten Feuchtebereich.



Nach ausreichender Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulationsergebnis wird das kalibrierte Set der Materialfunktionen in die Materialdatenbank übernommen und steht für die Verwendung in Simulationen zur Verfügung. Eine ausführliche Beschreibung des Kalibrierungsverfahrens liegt in *Scheffler 2008* vor.

Bei den im Feuchteatlas verwendeten Materialien handelt es sich überwiegend um Datensätze, die im Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des Instituts für Bauklimatik gemessen und kalibriert wurden. Für einige Materialien wurde auch auf die MASEA-Datenbank (Materialdatensammlung für die energetische Altbauanierung) zurückgegriffen. Eine Zusammenstellung aller Materialien und ihrer hygrothermischen Basisparameter befindet sich im Anhang.



2 Berechnungsverfahren

2.5 Zusammenstellung der Materialparameter

Vergleicht man die Ergebnisse nach dem DIN, COND und DELPHIN-Verfahren, muss man beachten, dass einerseits die (nicht) berücksichtigten Prozesse eine Rolle spielen, andererseits aber auch eine Schwierigkeit darin besteht, dass die Bedeutung der Materialparameter nicht in jedem Fall identisch ist. Eine Ursache dafür lässt sich auf die unterschiedlichen Funktionsansätze (konstant, linearisiert, beliebig) für die Transport- und Speicherkoeffizienten zurückführen. Eine andere Ursache liegt in der Bedeutung der Parameter, die teilweise die Gefahr der Verwechslung in sich birgt. Deshalb sind hier die verwendeten Materialkennwerte der Verfahren und deren Bedeutungen noch einmal in einer Übersicht zusammengestellt (Tabelle 2.3).

Tab. 2.3: Übersicht zu den verwendeten Materialkennwerten

	DIN	COND	DELPHIN
Wärmeleitfähigkeit	Rechenwert λ_R mit Feuchtezuschlag als konstante Wärmeleitfähigkeit	Rechenwert λ_R mit Feuchtezuschlag als Parameter der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit	Wert des trockenen Materials λ_{dry} als Parameter der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit
Rohdichte	-	-	Parameter ρ der Wärmespeicherung
Wärmekapazität	-	-	Parameter c der Wärmespeicherung
Dampfdiffusionswiderstandsfaktor	Parameter μ einer konstanten Wasserdampfleitfähigkeit	Parameter μ der konstanten Wasserdampfleitfähigkeit	Wert des trockenen Materials μ_{dry} als Parameter der Wasserdampfleitfähigkeit
Wasseraufnahmekoeffizient	-	Parameter A_w der linearisierten Flüssigwasserdiffusivität, korreliert mit Anstieg im überhyg. Bereich	Parameter A_w der Flüssigwasserleitfähigkeit, korreliert mit der Leitfähigkeit bei kapillarer Sättigung
Kapillare Sättigung	-	-	Parameter θ_{cap} der Feuchtespeicherefunktion
Effektive Sättigung	-	Parameter w_{eff} einer linearisierten Feuchtespeicherefunktion und der Flüssigwasserdiffusivität	Parameter θ_{eff} der Feuchtespeicherefunktion und der Flüssigwasserleitfähigkeit
Praktischer Feuchtwert bei 80% r.F.	-	Parameter w_{80} einer linearisierten Feuchtespeicherefunktion	-
Luftpermeabilität	-	-	Parameter $K_{g,dry}$ der Luftpermeabilität



2.6 Strömungen in Hohlräumen und durch luftdurchlässige Baustoffe

Der Einfluss und die Wirkung von Konvektionsströmungen durch offene oder innerhalb geschlossener Lufthohlräume auf das hygrothermische Verhalten einer Baukonstruktion lassen sich aufgrund der vielfältigen Einflüsse letztlich nur mittels numerischer Simulation beurteilen. Die Entwicklung der Strömungsmechanik und der Bauphysik vollzog sich lange Zeit getrennt voneinander, doch mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Computersysteme und voranschreitender Entwicklung der physikalischen Modelle auf beiden Gebieten wurden Versuche gestartet, diese miteinander zu verbinden (vgl. *Rüdiger et al 2003, Perschk & Meinhold 2006*).

Innerhalb des Projektes Feuchteatlas wurde von der FH Lausitz ein Strömungsmodul in DELPHIN4 implementiert, dessen Entwicklungsumfang sich vordergründig auf die Anforderung und Rahmenbedingungen vorerst kleinerer Lufthohlräume ausrichtet (*Gnoth 2007*). Der CaFD-Code gestattet die Berechnung einer inkompressiblen, laminaren Strömung von reibungsbehafteten Fluiden in einem zweidimensionalen Lösungsgebiet. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen sich gegenüberliegenden inneren Materialoberflächen wird in dem CaFD-Code mit berücksichtigt.

Die Überprüfung des entwickelten Codes erfolgte in zwei Stufen: Zunächst wurde die Rechengenauigkeit des neuen CaFD-Moduls an Hand von bekannten und in der Literatur (z.B. *Rieger 1984*) sehr gut beschriebenen Vergleichsrechnungen kontrolliert. Das sogenannte "Driven Cavity"-Problem (Nischenströmung) zum Test isothermer erzwungener Konvektion sowie das "Thermally Driven Cavity"-Problem bezüglich natürlicher Konvektion. Die Übereinstimmung zwischen den Literaturdaten und Simulationsrechnungen erwies sich als sehr gut.

Weitere experimentelle Untersuchungen an der FH Lausitz belegten, dass die DELPHIN4-CaFD Programmversion das gekoppelte aero-hygrothermische Verhalten plausibel und nachvollziehbar berechnet. Gemessene Temperatur- und Strömungsprofile sowie Wasserdampfstromdichten an Materialschichtgrenzen konnten mit guter bzw. akzeptabler Genauigkeit rechnerisch wiedergegeben werden. Anwendungsgrenzen des Moduls werden in *Gnoth 2007* formuliert.

In anderen, ausgewählten Testbeispielen konnte beobachtet werden, wie innerhalb von Lufthohlräumen Wasserdampfmassen über größere Distanzen transportiert werden. In Abhängigkeit von der Geometrie des Hohlraums, der Strömung sowie der ortsspezifisch vorherrschenden Oberflächentemperaturen kam es in bestimmten Bereichen einer Baukonstruktion zu Kondensatausfällen, die nicht mehr örtlich direkt im Zusammenhang mit der Feuchtequelle standen. Gleichzeitig wurde demonstriert, wie durch Konvektion ortsabhängig entstandenes Kondensat vom angrenzenden Material aufgenommen und anschließend in der Materialmatrix durch Diffusion und Kapillarwasserleitung weiter bewegt wird.

**Entwicklung eines
CaFD-Moduls für
DELPHIN4**



2 Berechnungsverfahren

Vereinfachtes Modul für Luftströmungen in DELPHIN5

Problematisch bleiben der hohe, anspruchsvolle Eingabeaufwand sowie die langen Rechenzeiten, insbesondere bei Echtzeitsimulationen, weshalb das erarbeitete CaFD-Modul für Anwender derzeit nicht freigeschaltet ist.

Das in DELPHIN5 verfügbare Modell für Luftströmungen (siehe Grunewald & Nicolai 2007 bzw. Gleichung (2.19)) ist implementiert worden, um den Einfluss der Luftströmung auf das hygrothermische Verhalten von Baukonstruktionen in handhabbarer Weise und mit vertretbarer Rechenzeit quantifizieren zu können. Es berücksichtigt die Durchströmung von luftdurchlässigen Materialien und auch die Strömung durch kleine Luftöffnungen wie z.B. Fugen. Es geht daher vereinfacht von laminaren, zweidimensionalen Verhältnisse aus. Der Einfluss der Schwerkraft wird ebenfalls berücksichtigt und führt zu einfachen Auftriebsströmungen. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen sich gegenüberliegenden inneren Materialoberflächen kann in DELPHIN5 mit einberechnet werden, er wird allerdings nicht automatisch berücksichtigt. Dazu ist eine Strahlungsaustausch-Feldbedingung zu spezifizieren und den inneren Oberflächen zuzuordnen.

Prinzipiell entspricht die Luftmassenstromgleichung in DELPHIN5 dem linearen Darcy-Gesetz für Strömungen, Turbulenzen werden somit nicht berücksichtigt. Die Reibung der Luftschichten untereinander und spezielle Übergangsbedingungen an den Rändern werden im Koeffizienten der Luftpermeabilität K_g zusammengefasst. Der Massentransport wird als rein konvektiv betrachtet und durch den Druckgradienten an den Rändern der Öffnung, sowie in vertikaler Richtung zusätzlich durch die Schwerkraft hervorgerufen. Eine umfassende Validierung des Modells steht noch aus. Es kann daher noch nicht für die breite praktische Anwendung empfohlen werden.

2 Berechnungsverfahren





3 Bewertungskriterien

3.1 Einführung

Entwicklung neuer Bewertungskriterien

Die Interpretation der Ergebnisse der hier vorgestellten und auf den Konstruktionskatalog in Teil II angewendeten bauphysikalischen Verfahren erfolgt durch Anwendung von Bewertungskriterien. Das Rechenergebnis liefert in Verbindung mit dem Bewertungskriterium eine Aussage über die Gebrauchstauglichkeit eines Wandaufbaus. Die Bewertungskriterien unterteilen sich in Kriterien nach DIN, die entsprechend auch für das COND-Verfahren übernommen werden können und in erweiterte Kriterien für Simulationsverfahren. Das Ziel ist die Vergleichbarkeit der Kriterien der verschiedenen Verfahren. Für viele Resultate aus den Simulationsrechnungen gab es bisher allerdings keine etablierten Bewertungskriterien, was eine Motivation für die vorliegende Arbeit liefert. Daher war es notwendig, neue Kriterien zu definieren, die auf neu entwickelten Algorithmen zur Auswertung der COND- und Simulationsergebnisse basieren. Diese Bewertungskriterien reichen aber auf Grund der Vielfalt der Simulationsergebnisse auch weit über die üblichen Vorgehensweisen hinaus. In ihrer Gesamtheit ergeben die Kriterien ein neues, umfassenderes Bewertungsverfahren.

Bewertung der Verfahren

Da der Arbeitsaufwand zur Erzielung von Rechenergebnissen höherer Genauigkeit mit der Simulation größer ist, sollte und kann man einen Mehrwert daraus erwarten. Ergebnisse mit höherer Genauigkeit führen aber erst dann zu einem Mehrwert, wenn die erweiterten Kriterien Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit zulassen, die vorher nicht oder nicht so zuverlässig erzielt werden konnten. Damit besteht die Möglichkeit, dass Wandaufbauten, die als gebrauchstauglich befunden wurden, auf Grund erweiterter Kriterien als nicht geeignet eingestuft werden. Umgekehrt kann es sein, dass gebrauchstaugliche Konstruktionen verworfen werden, weil das Verfahren nicht alle relevanten Prozesse berücksichtigt. Daraus ergibt sich auch die Möglichkeit der Bewertung der Verfahren. Führt die Anwendung verschiedener Verfahren zur gleichen Entscheidung bezüglich der Zulässigkeit einer Konstruktion? Können Grenzfälle mit Hilfe der Simulation genauer bewertet werden? Wie weit liegt man dann noch auf der sicheren Seite?

Die neu entwickelten Kriterien für die Simulationsverfahren können wichtige Argumente bei einer energetischen und feuchtetechnischen Bewertung und Optimierung von Konstruktionen liefern und ermöglichen darüber hinaus eine vergleichende Bewertung von Belastungskenngrößen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Konstruktionen. Im Sinne einer hohen Gebrauchstauglichkeit und Nachhaltigkeit sollte neben energetischen und hygrischen Aspekten auch eine Betrachtung des konstruktionsimmanenten Schadenspotentials erfolgen.



3.2 Stationäre Klimabedingungen

In den stationären Berechnungsverfahren nach DIN und COND werden nur konstante Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte verwendet. Die nachfolgenden Tabellen 3.1 und 3.2 zeigen die klimatischen Randbedingungen für die Bewertungsalgorithmen zum Wärme- und Feuchteschutz aus *DIN 4108-2* und *DIN 4108-3* sowie die thermischen Übergangskoeffizienten aus *DIN 6946*.

Tab. 3.1: *Klimate für stationäre Tauwasserberechnungen (DIN 4108-3) und für die (thermische) Berechnung des f_{Rsi} -Wertes nach DIN 4108-2*

Klima	Temperatur θ in °C	Relative Luftfeuchte φ in %
Tauperiode (Dauer: 60 Tage)		
Außenklima	-10	80
Innenklima	20	50
Verdunstungsperiode (Dauer: 90 Tage)		
Außenklima	12	70
Innenklima	12	70
Tauwasserbereich	12	100
Dachoberfläche	20	-
Berechnung des f_{Rsi}-Wertes (DIN 4108-2)		
Außenklima	-5	-
Innenklima	20	(50)

Tab. 3.2: *Im Feuchteatlas verwendete thermische Übergangswiderstände nach DIN 6946*

Wärmeübergangswiderstand in m^2K/W	
R_{si} (Wärmeübergang innen)	0,10 / 0,13**
R_{si} (für f_{Rsi} -Wert)*	0,25
R_{se} (Wärmeübergang außen)	0,04

*nicht für Verglasungen und Rahmen
** Wärmestrom aufwärts/horizontal

Um die Vergleichbarkeit zu wahren, wurden für COND- und Glaser-Berechnungen identische Klima- und Übergangsbedingungen angesetzt.

Bei der Berechnung des f_{Rsi} -Wertes werden im Vergleich zur Untersuchung des Feuchteverhaltens andere Werte für den inneren thermischen Wärmeübergangswiderstand und die Außentemperatur verwendet. Der kritischere Übergangswiderstand bei der f_{Rsi} -Wärmeschutzberechnung impliziert ungünstigere hygrothermische Verhältnisse nahe der Oberfläche, möglicherweise hervorgerufen durch z.B. unterbundene Luftkonvektion (siehe nächster Abschnitt).



3 Bewertungskriterien

3.3 DIN- und COND-Kriterien

3.3.1 Mindestwärmeschutz

Wärmedurchlasswiderstand

Die Berechnung des Mindestwärmeschutzes von Wand-, Decken- und Dachaufbauten erfolgt nach *DIN 6946* mit Hilfe der Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Materialschichten (R -Werte, Gleichung (2.1) unter Kapitel 2.3). Der Wärmedurchlasswiderstand leitet sich aus baustofflichen und baukonstruktiven Parametern ab (Wärmeleitfähigkeit, Schichtdicke) und charakterisiert als flächenbezogener Koeffizient die Wärmedämmeigenschaften einer Konstruktion.

Mindestwerte für den R -Wert, die der Verhinderung von Feuchteschäden dienen, sind in *DIN 4108-2 Tabelle 3*, beispielsweise für Außenwände von Aufenthaltsräumen zu finden.

$$R_{min} = 1,2 \text{ m}^2\text{K/W} \quad \text{für Außenwände} \quad (3.1)$$

Der Nachweis des Mindestwärmeschutzes für Außenwände ist normalerweise für sehr gering gedämmte Konstruktionen von Bedeutung. Er wäre z.B. bei einer Dämmstoffdicke von 4 cm (WLG 040 - Mineralwolle) oder 6 cm (WLG 065 - Calciumsilikat) auf 24 cm dicken Ziegelmauerwerk bereits erfüllt.

3.3.2 Transmissionswärmeverluste

Wärmedurchgangskoeffizient

Höchstwerte für den U -Wert zur Senkung der Transmissionswärmeverluste in der Heizperiode werden durch die Energieeinsparverordnung (*EnEV 2007*) vorgeschrieben. Die *EnEV 2007* fordert für Außenwände beheizter Wohngebäude allgemein einen U -Wert von 0.35 bzw. 0.45 $\text{W/m}^2\text{K}$, mit der *EnEV 2009* werden 0.28 $\text{W/m}^2\text{K}$ eingeführt. In der Vergangenheit wurde jedoch häufig sehr zurückhaltend auf der Innenseite gedämmt, weil unter anderem für denkmalgeschützte Häuser und Bestandsgebäude Ausnahmeregelungen geltend gemacht werden können. Im Teil II des Feuchteatlas werden deshalb innen gedämmte Wandaufbauten bewertet, deren Dämmstoffdicke eher moderat ist und 10cm nicht überschreitet. Das heißt aber nicht, dass größere Dämmstoffdicken für die Innendämmung grundsätzlich auszuschließen wären.

Im COND-Verfahren werden der U -Wert bzw. der R -Wert unter Verwendung einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit (siehe Gleichung (2.9) unter Kapitel 2.3) berechnet. Das kann bei diffusionsoffener Innendämmung zu Kondensatfall und zu einer Verschlechterung des U - bzw. R -wertes führen. Diese Verschlechterung ist aber im Allgemeinen gering, weil a) bei kapillaraktiven Systemen der Feuchtegehalt durch die Wirkung der Kapillarkräfte begrenzt wird oder b) nicht-kapillaraktive Systeme innenseitig mit ausreichendem Diffusionswiderstand ausgestattet werden sollten, damit es nicht zu Feuchteanreicherung kommt, wenn man Schlagregen und Havariefälle ausschließen kann.



3.3.3 Begrenzung der inneren Kondensatmenge

Um Schäden durch Feuchteansammlungen in der Konstruktion zu verhindern, wird die berechnete Menge des winterlichen Tauwasseranfalls (Kondensat) $m_{W,T}$ begrenzt. Da im Glaser- und im COND-Verfahren vereinfachte, stationäre Klimarandbedingungen angenommen werden, tritt die berechnete Kondensatmenge nicht wirklich auf, sondern ist im Allgemeinen geringer. Die errechnete Kondensatmenge dient daher nur diesem speziellen Nachweis und sollte nicht für andere materialspezifische Bewertungen herangezogen werden.

Kondensatmenge

$$m_{W,T} < 0,5 \text{ kg/m}^2 \quad (\text{nicht wasseraufnahmefähig}) \quad (3.2)$$

$$m_{W,T} < 1,0 \text{ kg/m}^2 \quad (\text{wasseraufnahmefähig}) \quad (3.3)$$

Die Forderungen und Grenzwerte in *DIN 4108-3* bzw. *DIN 68800-2* haben sich insofern in der Praxis bewährt, dass durch deren Einhaltung in der Regel Feuchteschäden in der Konstruktion vermieden werden, wenn schadhafte Feuchteansammlungen durch andere Ursachen, wie beispielsweise eindringenden Schlagregen oder eine Havarie ausgeschlossen sind.

Wichtiger als die Unterschreitung des Grenzwerts für Tauwasser ist jedoch die Anforderung, dass die in der Heizperiode potenziell anfallende Kondensatmenge $m_{W,T}$ nicht größer werden darf als die Trocknungsmenge (Verdunstungsmenge) $m_{W,V}$ in der warmen Witterungsperiode.

**Verdunstungs-
menge und
Trocknungsdauer**

$$m_{W,T} < m_{W,V} \quad (3.4)$$

Auf diese Weise wird die jährliche Akkumulation des Kondensats, eine Zunahme des Feuchtegehaltes über Jahre hinweg, verhindert. Die *EN ISO 13788* verzichtet auf die Festlegung eines Grenzwerts für Kondensat und stellt nur die Forderung nach einer vollständigen Verdunstung des Tauwassers in den Sommermonaten. Im COND-Verfahren wird anstelle dieser Forderung überprüft, ob die Trocknungsdauer t_V des angefallenen Kondensats kleiner ist als die Dauer der Verdunstungsperiode.

$$t_V < 2160h = 90d \quad (3.5)$$

3.3.4 Begrenzung des inneren Dampfdiffusionswiderstandes

Für Mauerwerke mit Innendämmung werden neben der *DIN 4108-3* auch in anderen, anerkannten Regelwerken wie *WTA 8-1-03* und *WTA 8-5* weitere, einfach zu ermittelnde konstruktive Kenngrößen als Kriterien für die praktische Ausführung herangezogen. Die durch das Innendämmsystem erreichte Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstandes ΔR korrespondiert mit der dampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_{di} der innen liegenden Schichten bis zur Kondensationsebene.

**Verbesserungen
des Wärmedurch-
lasswiderstandes**



3 Bewertungskriterien

ΔR ermöglicht eine Einschätzung, inwieweit die tragende, außenseitige Konstruktion abgekühlt wird, während ein höherer s_{di} -Wert in der Heizperiode den Transport von Wasserdampf vom Innenraum in die potentielle Kondensatebene reduziert. Andererseits verringert ein zu hoher s_{di} auch das Austrocknungsvermögen der Konstruktion zum Innenraum, wodurch sich ebenfalls eine zu hohe Feuchtebelastung einstellen kann. Diesem Sachverhalt soll mit der Forderung nach einer Begrenzung des s_{di} -Wertes Rechnung getragen (siehe auch *WTA 8-1-03*).

Die Festlegung entsprechender Grenzwerte basiert auf der Begrenzung der relativen Luftfeuchte auf der alten Innenwandoberfläche und der Forderung, dass das Trocknungspotenzial erhalten bleibt.

$$\varphi_{si} \leq \varphi_{si, max} \quad \text{Luftfeuchte auf der alten Innenwandoberfläche} \quad (3.6)$$

$$m_{W, V} \geq m_{W, V, min} \quad \text{Potenziell mögliche Verdunstungsmenge} \quad (3.7)$$

Die Forderung (3.6) bedeutet, dass die vorhandene Konstruktion nicht durch anfallendes Kondensat in Folge des Innendämmsystems belastet werden darf. Das Innendämmsystem hat die Feuchte von der bestehenden Konstruktion fern zu halten. Forderung (3.7) trägt dem Fakt Rechnung, dass im Fall von Feuchteinträgen durch Regen oder kleinere Havarien die Trocknungsfähigkeit der Konstruktion gewährleistet bleiben muss. Eine Auswertung des Konstruktionskataloges in Teil II bezüglich der Forderungen (3.6) und (3.7) muss erfolgen, um die Kriterien $\varphi_{si, max}$ und $m_{W, V, min}$ zu bestimmen. Auf dieser Basis können vorläufige Grenzwerte für $s_{di}(\Delta R)$ vorgeschlagen werden.

Im Zusammenspiel dieser Grenzwerte soll besonders bei organischen, feuchte-sensiblen Materialien wie Fachwerkhölzern oder Deckenbalken ein hohes Wassergehaltsniveau vermieden werden, was auch bezüglich der Vermeidung von Frostschäden von Bedeutung ist. Die gewünschte Reduzierung der Transmissionswärmeverluste und die Anforderungen des Feuchteschutzes müssen hier sinnvoll austariert werden.

3.3.5 Vermeidung von Tauwasser und Schimmel

Wärmebrücken

Schimmel an Bauteiloberflächen bildet sich in der Regel zuerst im Bereich von Wärmebrücken, welche in eindimensionalen Verfahren nicht abgebildet werden können. Durch den inneren Wärmeübergangswiderstand besteht die Möglichkeit, klimatisch ungünstigere Verhältnisse nahe bzw. auf der Bauteiloberfläche zu berücksichtigen, wie sie im Bereich von Wärmebrücken auftreten. Allerdings liegt die erhöhte Schimmelgefahr von Winkeln oft weniger in der Geometrie begründet, schließlich führen niedrigere Oberflächentemperaturen in einem nicht verstellten Gebäudewinkel zu erhöhter Luftbewegung (Konvektion) (*Erhorn et al. 1988*). Einen größeren Einfluss kann vielmehr die Gestaltung des Gebäudewin-



kels ausüben, wenn beispielweise durch die Dämmwirkung von Gardinen oder Möbeln die Wandoberflächentemperatur stark herabgesetzt wird.

Für die Vermeidung von Schimmelpilzwachstum auf Bauteiloberflächen wird in *DIN 4108-3* ein Grenzwert eingeführt.

Schimmelpilzbefall

$$\varphi_{si} < 80\% \quad \text{Grenzwert zur Schimmelvermeidung in DIN 4108-3} \quad (3.8)$$

Auch laut *EN ISO 13788* „sollte die relative Luftfeuchte an der Oberfläche über mehrere Tage den Wert von 80% nicht übersteigen“. Das Merkblatt *WTA 6-3-05* führt hierzu aus, dass auf biologisch gut verwertbarem Substrat (z.B. stark verschmutzten Oberflächen, Tapeten aus organischen Materialien) ab einer Luftfeuchte von 75% Schimmelpilze auskeimen und wachsen können. Ein 75%-Kriterium auf der „ungestörten“, eindimensionalen Wandoberfläche würde also noch einen gewissen Sicherheitszuschlag für Wandecken beinhalten.

Der Temperaturfaktor (f_{Rsi} -Wert nach *DIN EN ISO 10211-2* oder Θ in *Hauser & Stiegel 1992* bzw. ζ_{Ri} nach *CEN TC 89 1991*) wurde eingeführt, um eine Aussage über die Gefahr von Feuchteschäden an der Oberfläche (in erster Linie Schimmel) treffen zu können. Die Kenntnis der Temperaturen auf der Innenwandoberfläche soll für eine Beurteilung der hygrothermischen Situation genutzt werden. Die anliegenden Umgebungstemperaturen und die Wandoberflächentemperatur im Gebäudewinkel (oder an anderen Wärmebrücken) werden zu diesem Zwecke durch den f_{Rsi} -Wert miteinander in Beziehung gesetzt.

Temperaturfaktor

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si, \text{winkel}} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad \text{Temperaturfaktor im Gebäudewinkel} \quad (3.9)$$

Die Temperaturrandbedingungen für die Berechnung des f_{Rsi} -Wertes sind in *DIN 4108-2* mit $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ und $\theta_e \geq -5^\circ\text{C}$ festgeschrieben. Es gilt die Vereinbarung aus *DIN 4108-2* und *EN ISO 13788*, dass ein Grenzwert von

$$f_{Rsi} \geq 0,7 \quad \text{Mindestwert für Temperaturfaktor} \quad (3.10)$$

nicht unterschritten werden darf. Das bedeutet, dass die Oberflächentemperatur $\theta_{si, \text{winkel}} \geq 12,6^\circ\text{C}$ sein muss, was die relative Luftfeuchte auf der (neuen) Wandoberfläche (bei Innendämmung) unter stationären Bedingungen auf $\varphi_{si} \leq 80\%$ limitiert, wenn im Innenraum $\varphi_i = 50\%$ herrschen. Das Kriterium (3.10) zielt also darauf ab, den Schimmelpilzbefall bis zu einer Außenlufttemperatur von $\theta_e \geq -5^\circ\text{C}$ auszuschließen, wobei kurzzeitige Unterschreitungen wegen des thermischen Beharrungsvermögens der Konstruktion abgepuffert werden können.

Während sich der Temperaturfaktor für ungestörte Wandaufbauten leicht per Handrechnung bestimmen lässt, ist zur Berechnung im Gebäudewinkel ein Wärmebrückenprogramm erforderlich. Da DELPHIN auch über einen rein thermischen Berechnungsmodus verfügt, wird es hier ersatzweise als Wärmebrückenprogramm eingesetzt.



3 Bewertungskriterien

Luffeuchte an der Wandoberfläche

Eine direkte Aussage über die Feuchtebelastung der Wandoberfläche liefert natürlich die Angabe der relativen Luffeuchte auf der Innenwandoberfläche. Das erfordert die Bestimmung des Wasserdampfdruckprofils, wie es beispielsweise bei den COND-Ergebnissen ausgewiesen wird. Die Festlegung in *DIN 4108-2* und *EN ISO 13788* auf 80% relative Luffeuchte bezieht sich auch auf den Gebäudewinkel. Weil COND eindimensionale Wandquerschnitte berechnet, wird deshalb nicht eine relative Luffeuchte von 80% als Schimmelpilzkriterium herangezogen: Damit würde nicht der geometrische Wärmebrückeneffekt im Gebäudewinkel berücksichtigt. Die Auswertung des Konstruktionskataloges in Teil II ergab, dass erst bei Luffeuchten von

$$\varphi_{si} \leq 60\% \quad \text{Maximalwert für Oberflächenluffeuchte} \quad (3.11)$$

auf der ungestörten, eindimensionalen Wandoberfläche Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ausgeschlossen werden kann. Dabei sind die in Tabelle 3.1 und 3.2 definierten Randbedingungen anzuwenden. Dieser Grenzwert ist nur gültig bei Gebäudewinkeln, in denen zwei baugleiche, homogene Bestandskonstruktionen aufeinander stoßen. In historischen Holzfachwerkhäusern zum Beispiel kann der Luffeuchteverlauf im Gebäudewinkel sogar niedriger verlaufen als in der Mitte eines Gefachbereichs. Für diesen Fall können höhere Grenzwerte als Schimmelpilzkriterium festgelegt werden.

3.3.6 Wärmespeicherkapazität der innen liegenden Schichten

Wärmespeicherkapazität

Die Berechnung einer flächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherkapazität C_{wirk} analog zu *DIN 4108-6* bietet die Möglichkeit, die Fähigkeit der jeweiligen Konstruktion zu bewerten, Wärmebelastungen der Raumluft abzumildern bzw. zu verzögern. Hierzu werden die Wärmespeicherkapazitäten der innen liegenden Schichten aufsummiert. Entsprechend dem Vorschlag der *DIN 4108-6* gehen nur die „wirksamen“, ersten zehn Zentimeter des Bauteils in die Bewertung ein („10-cm-Regel“).

$$C_{wirk} = \sum_k (c_k \cdot \rho_k \cdot d_k) \quad \text{in } J/m^2K \quad (3.12)$$

Dämmstoffe sind zwar durch ihre hohe Porosität in Bezug auf die Verringerung der Heizenergieverluste sehr effektiv, verfügen jedoch nur über eine geringe Dichte und somit über eine niedrige Wärmekapazität. Zudem schotten Innendämmsysteme die Raumluft von den gut Wärme speichernden Schichten der bestehenden, tragenden Konstruktion ab. Wegen des geringen Wärmespeichervermögens können die Innendämmsysteme plötzlich auftretende Temperaturspitzen in der Raumluft schlecht abpuffern.

Eine höhere Wärmespeicherkapazität kann dagegen wegen geringerer Heiz- und Kühllasten zu Energieeinspareffekten führen. C_{wirk} wird in den COND-Ergebnissen mit ausgewiesen, es kann dafür aber derzeit noch kein Ausschlusskri-



terium definiert werden. Vergleiche zwischen verschiedenen Dämmvarianten und Dämmstoffdicken sind aber möglich. Ein Effekt von C_{wirk} ließe sich quantifizieren, wenn man ein konkretes Szenario (Klima, Raumgeometrie, Wandeigenschaften, Nutzung der thermischen Zone) definiert.

3.3.7 Beispielkonstruktion zur Demonstration der Kriterien

Die bisher erläuterten Bewertungskriterien für das DIN- und das COND-Verfahren sollen anhand eines Anwendungsbeispiels demonstriert werden. Dabei handelt es sich um ein einschaliges Mauerwerk aus Altbauziegeln, beidseitig verputzt, das innen mit Calciumsilikatplatten unterschiedlicher Dicke gedämmt wurde. Die Calciumsilikatplatten weisen eine hohe kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit auf und werden vollflächig verklebt (Abbildung 3.1). Den Abschluss bildet eine dünne Schicht Innenputz. Wegen der diffusionsoffenen Ausführung der Innendämmung ist in der Tauperiode mit Kondensat zu rechnen.

Die nachfolgende Materialtabelle 3.3 enthält die Materialkennwerte des Beispielwandaufbaus, die für das DIN und das COND-Verfahren verwendet wurden. Gleichzeitig entspricht das dem Set der Basismaterialparameter für DELPHIN.

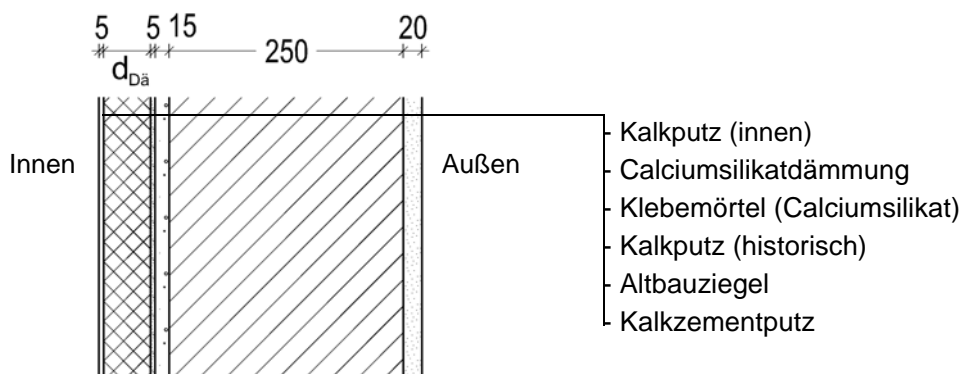


Abb. 3.1: Beispielwandaufbau zur Demonstration der Bewertungskriterien

Tab. 3.3: Materialkennwerte des Beispielwandaufbaus

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/mK	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikat	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (hist.)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033



3 Bewertungskriterien

Die Ergebnisse des DIN- und des COND-Verfahrens für die Beispielkonstruktion werden in den Tabellen 3.4 und 3.5 zusammengefasst. Sie geben jeweils die R - und U -Werte wieder, sowie die Werte für Kondensat- und Verdunstungsmengen, $m_{W,T}$ und $m_{W,V}$. Die DIN-Tabelle schließt mit dem $f_{R_{Si}}$ -Wert für den zwei-dimensionalen Gebäudewinkel, der mit Hilfe einer rein thermischen DELPHIN4-Berechnung unter konstanten Randbedingungen bestimmt wurde. Die COND-Tabelle führt stattdessen die Luftfeuchte an der neuen Innenwandoberfläche φ_{Si} , die Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstandes ΔR und die dampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_{di} , sowie die flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität C_{wirk} auf.

Die Werte für die unsanierte Variante werden mit den Ergebnissen für verschiedene Dämmstoffdicken verglichen. Die Dickenangaben beziehen sich immer nur auf die eigentlich wärmedämmende Schicht. Kleber- oder Deckschichten des Dämmsystems sind darin nicht enthalten. Bei Konstruktionen mit inhomogenem Wandaufbau wie Innendämmungen mit punktueller Verklebung, Konstruktionen mit Holzträgerkonstruktion oder Fachwerk, werden die Ergebnisse flächenanteilig berechnet.

3.3.8 Ergebnisse nach DIN 4108

Die DIN-Ergebnistabelle 3.4 zeigt, wie der Wärmedurchlasswiderstand erwartungsgemäß mit der Dicke der Dämmschicht steigt bzw. der Wärmedurchgangskoeffizient sinkt. Sowohl der Mindestwärmeschutz R_{min} als auch Temperaturfaktor $f_{R_{Si}}$ zielen auf eine Vermeidung von Feuchteschäden nicht nur auf der ungestörten inneren Wandoberfläche ab, sondern auch besonders im kritischeren Gebäudewinkel. Dementsprechend streng sind die Grenzwerte angelegt. Der $f_{R_{Si}}$ -Wert für den Gebäudewinkel zeigt an, dass Schimmel erst ab einer Dämmstoffdicke von 50 mm ausgeschlossen werden kann. Der Mindestwärmeschutz stellt dabei offensichtlich noch höhere Ansprüche, da mit $1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei 50 mm Dämmung die erforderlichen $1,20 \text{ m}^2\text{K/W}$ noch nicht eingehalten werden. Aus der Sicht des Mindestwärmeschutzes wären hier also 60 mm Dämmung erforderlich.

Tab. 3.4: Zusammenstellung der Ergebnisse nach DIN: U - und R -Wert (DIN 6946), Kondensat- und Verdunstungsmenge nach dem Glaserverfahren (DIN 4108-3), sowie Temperaturfaktor (DIN 4108-2)

Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	0,36	0,83	1,14	1,60
Wärmedurchgangskoeffizient	U	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1,90	1,00	0,77	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m^2	-	2,397	2,160	1,741
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m^2	-	3,749	2,649	1,876
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	$f_{R_{Si}}$	-	0,46	0,67	0,73	0,78

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$



Die Verdunstungsmenge liegt zwar immer über der berechneten Kondensatmenge, jedoch überschreiten alle ermittelten Werte die geforderte maximale Kondensatmenge von (hier) $1,0 \text{ kg/m}^2$ (DIN 4108-3). Dabei nimmt die Tauwassermenge bei Verwendung des Glaserverfahrens mit steigender Dämmdicke ab, da der höhere Dampfdiffusionswiderstand der dickeren Dämmschichten die Bildung von Kondensat reduziert. Der höhere Dampfdiffusionswiderstand der dickeren Dämmschichten verringert auch die Verdunstungsmenge. Das bedeutet, dass bei höher gedämmten Konstruktionen das Verdunstungspotenzial herabgesetzt wird und der Wandaufbau damit anfälliger für Schlagregen oder andere Feuchtequellen wird.

3.3.9 Ergebnisse nach COND

Die Tabelle 3.5 beinhaltet den Hinweis, dass die Berechnungen mit einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit ausgeführt wurden. Deshalb können sich bei den gedämmten Varianten je nach Menge des Kondensatausfalls andere R - und U -Werte als in der DIN-Tabelle ergeben. Im Glaser-Verfahren wurde ausschließlich der Rechenwert λ_R verwendet, während im COND-Verfahren, basierend auf λ_R eine kondensatabhängige Korrektur der R - und U -Werte erfolgte. Der Vergleich des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem DIN und COND-Verfahren erbringt eine feuchteabhängige Verschlechterung für die drei Dämmvarianten von 2,4%, 3,5% bzw. 4,3%.

Tab. 3.5: Zusammenstellung der Ergebnisse nach dem COND-Verfahren

Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,36	0,81	1,10	1,53
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,90	1,02	0,79	0,59
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m^2	-	0,162	0,332	0,563
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m^2	-	3,749	2,649	1,876
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{Si}	%	80,2	64,2	60,6	57,7
Innendämmsystem:					**feuchteabhängig	
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	$\text{W} \cdot \text{h/K}$	46,8	34,7	26,9	15,5

Genauso deutlich, wie die Tauwassermengen mit dem Glaserverfahren über dem Grenzwert liegen, bleiben sie durch die Berücksichtigung der Flüssigwasserleitfähigkeit in dem COND-Verfahren unter $1,0 \text{ kg/m}^2$. Auffallend ist, dass die Kondensatmengen mit der Dämmdicke ansteigen, sich also gegenläufig zu den Ergebnissen in Tabelle 3.4 verhalten. Das hat seine Ursache im zunehmenden Widerstand der Dämmschicht gegen den kapillaren Transport. Die kapillar transportierte Feuchte braucht länger, um die Innenseite zu erreichen um dort zu ver-



3 Bewertungskriterien

dunsten. Die Verdunstungsmenge nimmt auch nach dem COND-Verfahren mit größerer Dämmstoffdicke ab. Die Zahlenwerte sind identisch zum DIN-Verfahren, weil im COND-Verfahren der kapillare Flüssigwassertransport nur bei der Berechnung des Kondensats berücksichtigt wird.

Das Temperatur- und das Wassergehaltsprofil in dem Diagramm in Abbildung 3.2 illustrieren die Werte aus Tabelle 3.5. Die rote Linie veranschaulicht, wie die Temperatur durch den thermischen Übergangskoeffizienten in der Nähe der Wandoberfläche abnimmt und sich in einem starken Abfall über die Wärmedämmschicht fortsetzt.

Die hellblau eingefärbten Bereiche zeigen die hygroskopische Aufladung an. Die maximale hygroskopische Feuchte wird aus dem praktischen Feuchtegehalt w_{80} mit Hilfe der linearisierten Sorptionsisotherme nach COND bei einer relativen Luftfeuchte von 95% ermittelt und als blaue, waagerechte, in der Bildschirmdarstellung gestrichelte Linie im Diagramm angezeigt. Erreicht die hellblaue Fläche die waagerechte Linie, ist das Material hygroskopisch aufgeladen. Je höher die maximale hygroskopische Feuchte liegt, um so mehr Feuchte speichert das Material bei einer Änderung der Luftfeuchte; je höher ist die Feuchtepufferkapazität. Besonders der zementhaltige, 5 mm dicke Calciumsilikat-Klebmörtel und der Kalkzement-Außenputz speichern große Mengen Feuchte, bevor es zur Kondensation kommt. Die Dämmung und der Altbauziegel dagegen weisen bei einer ähnlichen Luftfeuchte nur einen geringen Feuchtegehalt auf.

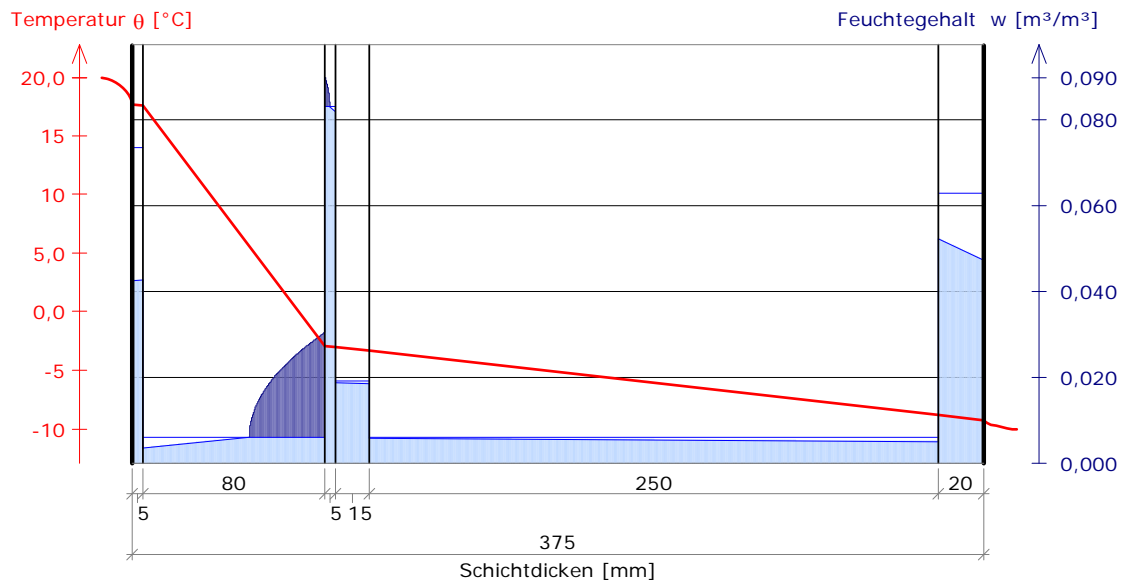


Abb. 3.2: COND-Diagramm für die Beispielkonstruktion mit 80 mm Dämmschichtdicke: Temperatur- und Wassergehaltsprofil nach einer Kondensationsperiode von 60 Tagen

Der überhygroskopische Wassergehalt wird dunkelblau angezeigt. Die Summe der überhygroskopischen Wassermassen der Materialschichten wird als Kondensatmenge von COND ausgewiesen. Oft ist es von Bedeutung zu wissen, wo



das Kondensat ausfällt. In Abbildung 3.2 ist das der Bereich zwischen Calciumsilikat und der Kleberschicht. Die vorhandene Konstruktion kommt nicht mit Kondensat in Berührung.

Im Wassergehaltsprofil sind an den Schichtgrenzen zum Teil deutliche Sprünge festzustellen. Jeder gegebenen Luftfeuchte kann über die Feuchtespeicherfunktion des Materials ein Wassergehalt zugeordnet werden (siehe Kapitel 2.3 und Abschnitt 2.4.3). Das Profil der relativer Luftfeuchte ist wie das Temperaturprofil eine stetige Funktion. Bei gleicher relativer Luftfeuchte entstehen dadurch unterschiedliche Wassergehalte an den Materialschichtgrenzen.

3.3.10 Zusammenstellung der Nachweise

Bei der Zusammenstellung der Nachweise ist der direkte Ergebnisvergleich des DIN- und COND-Verfahrens von Interesse. In Tabelle 3.6 wird veranschaulicht, für welche Dämmschichtdicken welche Nachweise mit welchem Verfahren erbracht werden können und die nicht eingehaltenen Grenzwerte sind deutlich gekennzeichnet.

Tab. 3.6: Zusammenstellung der Nachweise für das DIN und das COND-Verfahren

Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓

Bezüglich des Mindestwärmeschutzes liefern beide Algorithmen gleiche Bewertungen: Nur mit einer 80 mm dicken Dämmung wird die Forderung der *DIN 4108-2* erfüllt. Diskrepanzen treten erwartungsgemäß bei der Beurteilung der zulässigen Kondensatmenge auf. Mit dem Glaserverfahren gelingt es nicht, den Nachweis nach *DIN 4108-23* zu erbringen, während mit dem COND-Verfahren für alle drei Dämmstoffdicken ein positives Ergebnis ausgewiesen werden kann. Mit einem Blick in Tabelle 3.4 lässt sich abschätzen, dass auch mit einer Dicke von beispielsweise 100 mm die Kondensatmenge nach Glaser immer noch zu hoch wäre, auch wenn die Tauwassermengen mit der Dicke kontinuierlich abnehmen. Der Nachweis der Verdunstung des Kondensats erfolgt bei beiden Verfahren in gleicher Weise und gelingt problemlos. Oberflächenkondensat tritt nicht auf. Die Vermeidung von Schimmelpilzbefall im Gebäudewinkel wird bei der Bewertung mit dem Temperaturfaktor ab einer Dämmschichtdicke von 50 mm erfüllt, wohin-



3 Bewertungskriterien

gegen $\varphi_{s,i}$ in Übereinstimmung mit dem Mindestwärmeschutz erst mit 80 mm Dämmung eingehalten wird.

Um die Nachweise in Tabelle 3.6 führen zu können, mussten stark vereinfachende Annahmen bezüglich der Klimabedingungen und der Materialparameter getroffen werden. Das birgt die Gefahr in sich, dass die Sicherheitszuschläge zu groß gewählt werden und funktionsfähige Lösungen nicht zur Anwendung kommen. Auch der umgekehrte Fall ist denkbar: die Wirkung der Kapillarität kann auf Grund der vereinfachten Flüssigwasserleitfunktion überschätzt werden. Damit bestünde die Gefahr, dass die zulässige Kondensatmenge trotzdem überschritten wird, obwohl man mit COND-Verfahren zur gegenteiligen Aussage gelangt.

Daher soll der Vergleich mit potenziell genaueren Verfahren zum einen zeigen, wo noch Reserven bezüglich der Optimierung von Wandaufbauten bestehen. Das ist in Hinblick auf die kommenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden besonders wichtig. Zweitens sollen verbleibende Restrisiken aufgedeckt werden, um die Rechenverfahren und Bewertungskriterien noch zuverlässiger zu gestalten.



3.4 Klimadaten für Simulationsverfahren

3.4.1 Auswahl der Testreferenzjahre (TRY)

Für das instationäre Außenklima wurden die Stundenwerte eines Testreferenzjahres, üblicherweise mit TRY (Test Reference Year) abgekürzt, mit durchschnittlichen Witterungsverhältnissen verwendet. Der Deutsche Wetterdienst, ansässig in Offenbach, hat Deutschland in 15 verschiedene Klimaregionen eingeteilt (*Christoffer et al. 2004*). Testreferenzjahre sind aus realen Witterungsabschnitten zusammengesetzt. Die Zeitabschnitte wurden so bestimmt, dass die Jahreszeitenmittelwerte der einzelnen Elemente aller Regionen möglichst gut mit den dreißigjährigen Mittelwerten übereinstimmen.



Abb. 3.3: Deutschlandkarte mit TRY-Regionen; TRY-Region 13 mit Referenzstandort Passau in rot (bearbeitetes Bild: Christoffer et al 2004, DWD Offenbach)

Für die instationären Berechnungen wurde das Klima der Testreferenzregion 13 mit dem Referenzstandort Passau ausgewählt (Abbildung). Die Wahl liegt zum einen in der großen territorialen Ausdehnung, der Bevölkerungsdichte als auch in den Klimawerten begründet.

Mit einer winterlichen Durchschnittstemperatur von -1°C ist es vergleichsweise kalt, nur recht kleine Gebiete, wie die TRY-Region 10 (Hof), TRY-Region 11 (Fichtelberg) und TRY-Region 15 (Garmisch-Partenkirchen) weisen niedrigere Durchschnittstemperaturen im Winter auf. Mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von $8,2^{\circ}\text{C}$ liegt das verwendete Klima über dem Durchschnitt aller Gebiete. Werden wiederum sehr kleine Klimaregionen vernachlässigt, die allesamt durch ein sehr kaltes durchschnittliches Jahresklima charakterisiert sind (TRY-Region

Testreferenzjahre in Deutschland



3 Bewertungskriterien

8 (Braunlage), TRY-Region 11 (Fichtelberg), TRY-Region 14 (Stötten) und TRY-Region 15 (Garmisch-Partenkirchen)), beläuft sich die Jahresdurchschnittstemperatur der verbliebenen Gebiete auf 8,5°C.

Zu Vergleichszwecken wurde in einigen Simulationen auch ein anderes Außenklima, TRY-Region 04 mit dem Referenzstandort Potsdam, angeordnet.

Da in den Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes keine Werte mehr für die stündliche Niederschlagsmenge enthalten sind, wurden diese mit Hilfe der detaillierten meteorologischen Informationen in *Christoffer et al. 2004* sowie aus langjährigen Monatsmittelwerten des Testreferenzortes generiert. Die gesamte Schlagregenmenge auf eine horizontale Fläche der in den Simulationen verwendeten Regendaten summiert sich im Jahr für TRY-Region 13 auf 952,3 l/(m²a).

3.4.2 Klimaelemente

Zu den üblicherweise in Simulationen verwendeten Klimaelementen zählen die Datensätze auf Stundenbasis der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der direkten und diffusen Strahlung, der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung sowie der Windgeschwindigkeit, -richtung und der Niederschlagsmenge. Eine grafische Darstellungen Verläufe der im Feuchteatlas verwendeten Klimadaten ist im Anhang zu finden.

Die Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte werden in den Simulationen direkt als Randbedingung (3.Art) unter Beachtung der Übergangswiderstände berücksichtigt. Es erfolgt bisher keine spezielle Umrechnung der TRY-Daten auf die gebäudespezifische Umgebung. Der Einfluss der Strahlung und des Schlagregens wird dagegen durch Modelle beschrieben, die eine Umrechnung der im freien Feld gemessenen Daten auf die Wandoberfläche erlauben. Die Modelle für Strahlung und des Schlagregen sollten daher kurz diskutiert werden.

Kurzweilige Strahlung

In der Bauphysik unterscheidet man im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung den kurzwelligen Bereich von $\lambda_{sw} = 0,3 - 3 \mu m$, der auch das sichtbare Licht enthält, und den langwelligen Bereich von $\lambda_{lw} = 3 - 30 \mu m$. Die kurzweilige Einstrahlung unterteilt sich in den Anteil der direkten, gerichteten Sonnenstrahlung und einen Anteil diffuser, ungerichteter Strahlung, der aus der Wolkendecke emittiert werden kann oder aber auch auf diffuse reflexion aus der Umgebung zurückgeht. Die kurzweilige direkte Strahlung ist in den TRY-Daten als Strahlung auf eine Horizontalfläche gegeben, die vom Standort, der Bedeckung, und den Eigenschaften der Atmosphäre (Trübungsfaktor) abhängt. Sie muss daher auf die Wandfläche umgerechnet werden, wobei Wandrichtung, Wandneigung und auch Datum/Tageszeit und die Standortdaten (geografische Breite, Höhe über N.N.) eingehen. Auch bei der Umrechnung der diffusen Strahlung muss die Wandneigung beachtet werden. Die absorbierte Wärmestromdichte schließlich ergibt sich durch Multiplikation der senkrecht auf die Wand einfallenden Strahlungsstromdichte und dem Absorptionskoeffizienten, der von



der Farbe bzw. dem Farbsättigungsgrad der Oberfläche abhängt. Für den Absorptionsfaktor des kurzwelligen Strahlungsaustauschs wurden einheitlich 0,65 gewählt. Damit entspricht der Faktor einer mittleren bis dunklen Oberfläche bzw. einer leicht rauen Oberfläche (*Fischer et al. 2008*).

Die langwellige Abstrahlung von Körpern lässt sich nach der *Stefan-Boltzmann-Gleichung* berechnen, in welches die Wandoberflächentemperatur zur vierten Potenz eingeht. Die langwellige Abstrahlung kann bei klarem Himmel zur Unterkühlung der Bauteiloberfläche führen. Bei bedecktem Himmel kompensiert die atmosphärische Gegenstrahlung die langwelligen Strahlungsverluste. Die Abstrahlung ist abhängig von der Neigung der untersuchten Konstruktion gegen den Himmel und das Erdreich. Flachdächer stehen mit dem Himmel im Strahlungsaustausch, Überhänge mit dem Boden. Vertikale Wände erhalten sowohl vom bedeckten Himmel aus auch von der Umgebung und dem Boden eine langwellige Zustrahlung.

Langwellige Strahlung

Emissionskoeffizienten für langwellige Abstrahlung liegen üblicherweise im Bereich von $\varepsilon_{lw} = 0,9$. Deshalb wird dieser Wert als Standardwert für den Emissionskoeffizient der langwelligen Abstrahlung bei mineralischen Oberflächen gesetzt. Metallische Oberflächen weisen einen Emissionskoeffizienten von ungefähr bis zu 0,2 auf.

Die derzeit genaueste Methode zur Berechnung des auf eine Wand auftreffenden Schlagregens stellt die Modellierung mittels CFD-Strömungssimulationen dar, welche jedoch nur sehr aufwändig für vorher genau definierte Regenereignisse durchgeführt werden kann (*Blocken 2004*). Lage und Geometrie der untersuchten Stelle und des Gebäudes sowie einige Umgebungsfaktoren (andere Häuser, Vegetation) üben dabei einen großen Einfluss aus, sodass streng genommen immer nur Modellfälle betrachtet werden können. Die *DIN EN ISO 15927-3* versucht diesem Umstand mit der Berechnung eines Schlagregenindex gerecht zu werden. Zu den makroskopischen Randbedingungen müssen bei der Berechnung der eindringenden Schlagregenmenge für mikroskopische Einflüsse ebenfalls Festlegungen getroffen werden: Die Oberflächenstruktur und Beschaffenheit der Oberfläche (benetzbare Fläche, Verschmutzung) oder die zu große Schlagregenmenge, von der ein Teil von der Fassade wieder abspritzt bzw. herabfließt, bewirken, dass nur ein Teil des tatsächlich auftreffenden Niederschlags aufgenommen wird.

Schlagregen

Das Verfahren der *DIN EN ISO 15927-3*, das zur Berechnung der stündlichen Schlagregendichte herangezogen wurde, berechnet zuerst mit den gemessenen stündlichen Werten von Windrichtung, -geschwindigkeit und stündlichen Gesamtniederschlagsmenge sowie der Wandausrichtung den jährlichen Windfeldindex



3 Bewertungskriterien

$$I_A = \frac{2}{9} \cdot \frac{\sum v \cdot r^{8/9} \cdot \cos(D - \Theta)}{N} \quad \text{in l/m}^2\text{-a} \quad (3.13)$$

mit den Variablen

- v Stundenwerte der Windgeschwindigkeit in m/s
- r Stündliche Gesamtniederschlagsmenge in mm
- D Stundenmittel der Windrichtung (°)
- Θ Winkel zwischen Norden und der Wandnormalen (°).

Da es sich in diesem Fall bei den Eingangswerten um bearbeitete Klimadaten eines Jahres und nicht um langjährige Klimamessreihen handelt, beträgt die Anzahl der Jahre mit verfügbaren Messdaten $N = 1$. Mit der Winkelfunktion in Gleichung (3.13) geht nur der senkrecht auf die Wand auftreffende Anteil des Niederschlags in die Berechnung mit ein.

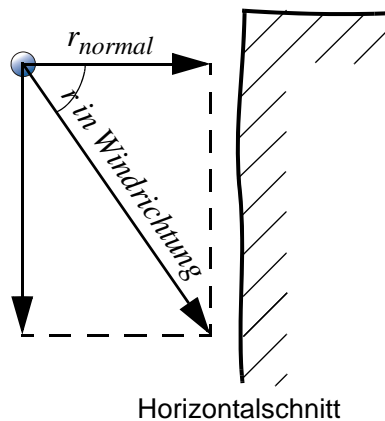


Abb. 3.4: Horizontalschnitt mit Gesamtniederschlagsmenge in Richtung des Niederschlags (Windrichtung) und der auf die Wandoberfläche auftreffende Niederschlag

Gemäß Definition umfasst I_A die jährliche „Schlagregenmenge auf eine senkrechte Wand der angegebenen Ausrichtung in 10 m Höhe über dem angrenzenden Erdboden in der Mitte des Windfeldes am geographischen Ort der Wand je Quadratmeter Wandfläche“ (DIN EN ISO 15927-3). Der Wandindex I_{WA} schließlich beinhaltet Standortfaktoren wie Topographie, örtlicher Windschutz und die Art des Gebäudes. Mit Hilfe der Gleichung des Wandindex I_{WA} wurden für die Simulationen die Stundenwerte des Schlagregens festgelegt:

$$I_{WA} = I_A \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \quad \text{in l/m}^2\text{-a} \quad (3.14)$$

Der Geländeerhöhungsfaktor C_R bezieht die Höhe des untersuchten Punktes über dem Erdboden und die Beschaffenheit der Geländeoberfläche auf der Anströmseite mit ein. Für den Feuchteatlas wurden grundsätzlich eine Höhe von 5 Meter für den untersuchten Punkt und die Geländekategorie II (landwirtschaftlich



Nutzfläche mit Heckenbegrenzung, gelegentliche kleine landwirtschaftlich Bauten, Häuser oder Bäume) ausgewählt.

Der Topographiefaktor C_T berücksichtigt spezielle, sehr exponierte Standorte wie frei stehende Bergkuppen und Steilhänge und betrug immer $C_T = 1$.

Der Hindernisfaktor O erfasst den Einfluss von Hindernissen (Bäumen, Gebäuden oder Monumenten) mit mindestens derselben Höhe wie die untersuchte Wand. Für O wurde einheitlich ein Wert von 0,6 festgelegt, was einer Entfernung Wand-Hindernis von 40 bis 60 m entspricht.

In den Wandfaktor W gehen sowohl die Gebäudeform, die ungefähre Gebäudehöhe bzw. die Höhe der untersuchten Stelle als auch insbesondere das Vorhandensein eines Traufüberstandes ein (siehe Abbildung 3.5). Hierfür wurde $W = 0,4$ gewählt.

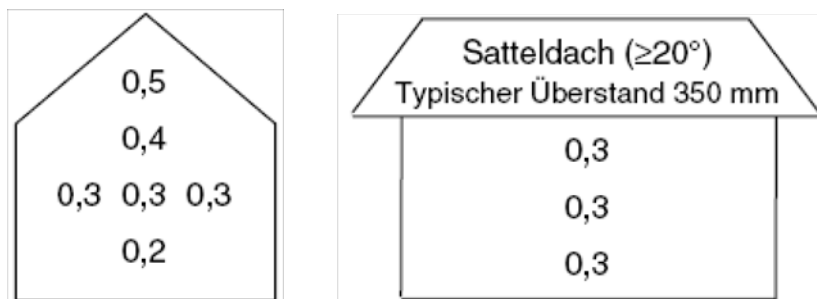


Abb. 3.5: Wandfaktor W in Abhängigkeit von der Position der untersuchten Stelle
 Links: Dreigeschossige Giebelwand ohne Traufüberstand
 Rechts: Dreigeschossige Giebelwand mit Traufüberstand

In den Simulationen wird unterschieden zwischen Berechnungen mit und ohne Schlagregeneinfluss:

1.) Ohne Schlagregeneinfluss: Hier war die Konstruktion nach Norden ausgerichtet: Die „strahlungsärmste“ Ausrichtung führte auf den Innenoberflächen zu den ungünstigsten Klimaverhältnissen.

2.) Mit Schlagregeneinfluss: In diesen Simulationen wurde die Konstruktion nach Westen ausgerichtet, da hier die größte Schlagregenmenge verzeichnet werden konnte.

Diese Auswahl zielte bewusst darauf ab, jeweils zwei Maximalfälle zu untersuchen, mit denen ein Korridor wiedergegeben wird, innerhalb dessen sich das hygrothermische Verhalten der Konstruktionen abspielt.

Bei der Simulation mit Schlagregeneinfluss wurden Oberflächeneffekte, die das Eindringen von Schlagregen herabsetzen, wie z.B. das Abfließen des Regens und die durch (Staub-)Ablagerungen verminderte Benetzbarkeit auf ein Minimum reduziert, sodass ein „worst-case“-Szenario geschaffen wurde.



3 Bewertungskriterien

Mit dem Schlagregen wurde die potenziell größte Feuchtequelle berücksichtigt. Es ist nicht ungewöhnlich, dass die Menge des eindringenden Schlagregens die des Kondensats, das sich auf Grund von Diffusionserscheinungen im Winter an der Innendämmung bildet, um ein Vielfaches übersteigt. Diese eindringende Feuchte wird in erster Linie in den außen liegenden Schichten gespeichert und kann von dort aus wieder gefahrlos verdunsten. Bei Konstruktionen mit diffusionsdichten Innendämmsystemen, die den Wasserdampftransport vom Innenraum in die Konstruktion zum Teil vollständig unterbinden, lässt sich erst nach der Berücksichtigung von Schlagregenereignissen die wahre Feuchtebelastung feststellen. Dies gilt in besonderem Maße für historische Bauten mit Sichtmauerwerk, die nicht über einen ausreichenden Schlagregenschutz verfügen, oder bei historischen Fachwerkkonstruktionen, die das Austrocknungspotential zum Innenraum hin unbedingt benötigen (Ruisinger & Plagge 2008).

In den zweidimensionalen Simulationen von Gebäudeecken wurde grundsätzlich die Nordwestecke mit Schlagregeneinfluss ausgewählt.

3.4.3 Raumklima

Die Stundenwerte des Innenklimas wurden mit Hilfe der im Anhang der *DIN EN 15026* enthaltenen Diagramme entwickelt. Dabei kann aus den Außenlufttemperaturen (Abbildung D.1 im Anhang) die Innenraumtemperatur und -luftfeuchte bestimmt werden. Um Spitzenbelastungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Tagesverlauf nicht herauszumitteln, wurden die eigentlich für Tagesmittelwerte angegebenen Diagramme für die Bildung von Stundenwerten verwendet.

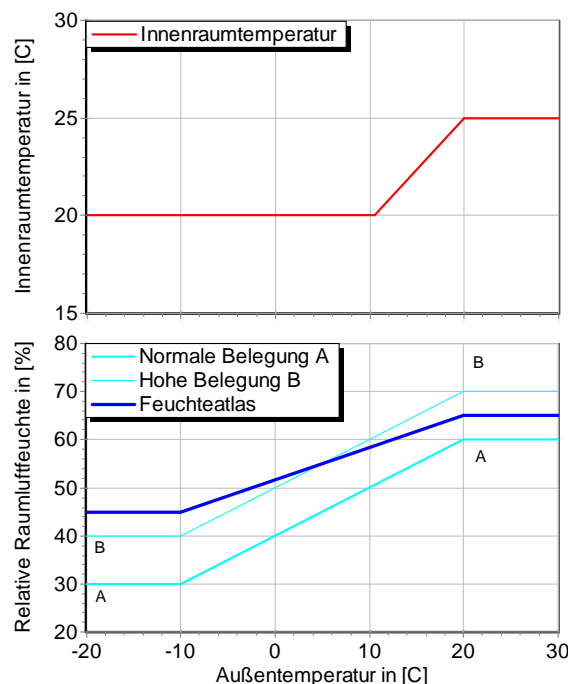


Abb. 3.6: Diagramme zur Berechnung des Innenklimas auf Basis der Außentemperatur (*DIN EN 15026*): Raumseitige Temperatur (oben) und relative Luftfeuchte (unten)



Damit sich die Ergebnisse auf der sicheren Seite befinden, wurde der Berechnung der Raumlufffeuchte die Kurve der hohen Belegung (Kurve B) zu Grunde gelegt, jedoch in modifizierter Form: Statt zwischen 40 und 70% verläuft sie zwischen 45 und 65%. Die ursprüngliche Kurve B würde zu hohe Luftfeuchten im Sommer und zu unkritische Luftfeuchten im Winter bewirken. Es würde ein Auftreten von Schimmelpilzen prognostiziert, wie es nicht den üblichen Beobachtungen im mitteleuropäischen Raum entspricht: Statt im Winter und in der Übergangszeit würde hauptsächlich im Hochsommer das Auskeimen von Schimmelpilzen vorhergesagt, zudem würde die niedrige Raumlufffeuchte im Winter zu einem geringeren Eintrag von Luftfeuchte in die Konstruktion führen. Die Ergebnisse lägen nicht mehr eindeutig auf der sicheren Seite.

Mit obigem Ansatz (siehe Abbildung 3.6) für den stündlichen Verlauf der Innentemperatur und der relativen Luftfeuchte ergeben sich die in Abbildung 3.7 abgebildeten Verläufe des Innenklimas.

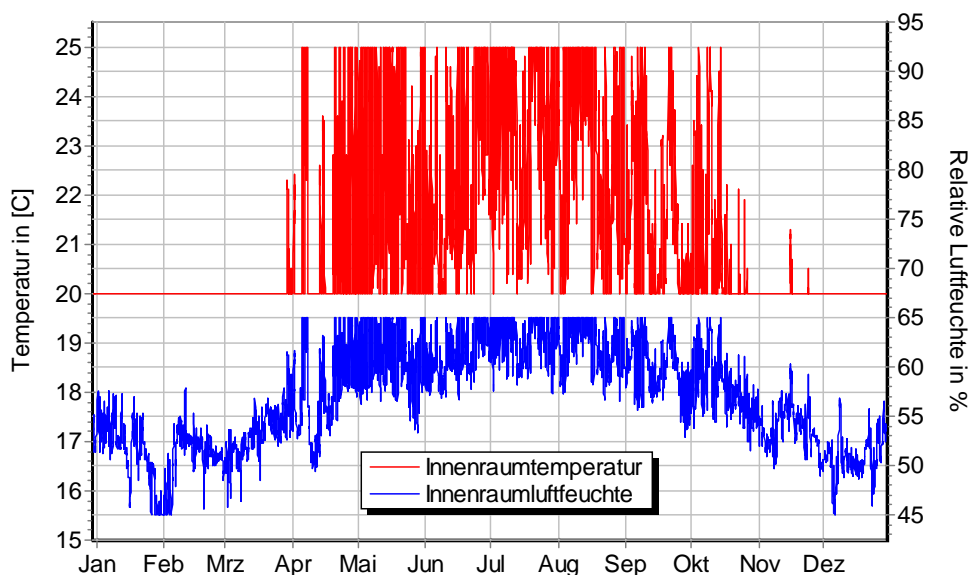


Abb. 3.7: Gang der Stundenwerte von Innenraumtemperatur und -luftfeuchte

Die Entwicklung des Innenraumklimas aus der Außentemperatur führt dazu, dass im Winter die Außentemperaturen sehr häufig die Heizgrenztemperatur von ca. 10°C unterschreiten, die Innenraumtemperatur beträgt deshalb von Ende Oktober bis Ende März nahezu konstant 20°C. In den wärmeren Monaten zeichnen sich jedoch die täglichen Außentemperaturschwankungen deutlich ab, weil dann Innenraumtemperaturen bis 25°C erreicht werden.

Der thermische Übergangskoeffizient übt einen großen Einfluss auf die hygrothermischen Verhältnisse auf der Bauteiloberfläche aus. Die in den eindimensionalen Simulationen verwendeten Werte sind der *DIN 6946* (siehe Tabelle 3.2) entlehnt: Für eine vertikale Außenwand 7,7 W/m²K im Innen- und 25,0 W/m²K im Außenbereich.

Übergangskoeffizienten



3 Bewertungskriterien

Bei der Wahl des Übergangskoeffizienten im Winkelbereich flossen folgende Betrachtungen ein: In praktischen Messungen (*Erhorn et al. 1988*) wurde im unverstellten Winkelbereich ein minimaler Wärmeübergangskoeffizient von $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgestellt. Dabei nimmt der Strahlungsanteil am Wärmeübergangskoeffizienten zur Ecke hin ab. Der strömungsbedingte, konvektive Anteil am Übergangskoeffizienten dagegen nimmt zur zweidimensionalen Ecke hin sogar zu! Wie in *Erhorn et al. 1988* erläutert wird entsteht durch die niedrigeren Oberflächentemperaturen in der zweidimensionalen Ecke ein größeres Temperaturgefälle zur Raumtemperatur, wodurch der höhere Gradient eine stärkere Luftströmung erzeugt.

Wird an Außenwänden die Luftkonvektion durch Einrichtungsgegenstände wie Gardinen oder Einbauschränke herabgesetzt, wirken die Gegenstände wie eine zusätzliche Innendämmung. In Gebäudewinkeln wird so die ohnehin niedrigere Oberflächentemperatur weiter abgesenkt. *Rudolphi & Kirchner 2000* oder *Sedlbauer 2001* berufen sich auf *Ciezielski 1999* und übertragen diesen zusätzlichen Dämmeffekt auf den thermischen Übergangswiderstand. *Ciezielski 1999* propagiert in Abhängigkeit von der Möblierung folgende Werte:

Einbauschränke: $R_{si} = 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$,

Freistehende Schränke: $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$,

Gardinen: $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Im Feuchteatlas wurde bei zweidimensionalen Berechnungen im unmittelbaren Eckbereich, d. h. ungefähr bis zur Hälfte der Außenmauerdicke, ein Wärmeübergangswiderstand von $0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$ angeordnet, im übrigen Bereich gelten $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Gegenüber *Erhorn et al. 1988* bewegen sich die Berechnungsergebnisse somit auf der sicheren Seite, berücksichtigen jedoch nicht beispielsweise einen Einbauschränk. Damit wurde beabsichtigt, dass die Verwendung eines zu niedrigen Übergangskoeffizienten letztlich nicht einen überzogenen baulichen Aufwand nach sich zieht. Der gewählte Wert folgt somit der Argumentation in *Mainka & Paschen 1986*. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass bei einem unangemessenem Nutzerverhalten oder durch Fehler bei der Inneneinrichtung kritischere Werte im Gebäudewinkel zu erwarten sind. Ein fachkundiger Planer sollte in der Lage sein, Bauherren oder Mietern diesen Sachverhalt zu vermitteln wie er auch andere, durch die Nutzung bedingte erhöhte Feuchtelasten erkennen sollte, um dann geeignete Gegenmaßnahmen, wie die Verwendung eines Dämmkeils oder einer Zwangslüftung zu treffen.

Der Dampfübergangskoeffizient betrug raumseitig konstant $5,88 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$ und auf der Außenwandoberfläche konstant $1,84 \cdot 10^{-7} \text{ s/m}$.



3.5 Neue Kriterien für Simulationsverfahren

3.5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen

Das Porensystem von kapillarporösen Baustoffen speichert Wasser bei jeder relativen Luftfeuchte in absorbiertes (flüssiger) Form. Der Anteil der Feuchtespeicherung in Form von Wasserdampf ist dagegen vernachlässigbar klein. Die ursächlichen Wirkmechanismen, die zur Speicherung in flüssiger Form führen, werden als Dampfdruckabsenkung und Kapillarkondensation bezeichnet. Über dem Meniskus, der gekrümmten Wasseroberfläche einer gefüllten Baustoffpore, bildet sich ein Dampfdruck aus, der kleiner als der Sättigungsdampfdruck ist. Dadurch liegt in den luftgefüllten Poren eines kapillarporösen Baustoffes üblicherweise eine relative Luftfeuchte von weniger als 100% vor, obwohl gleichzeitig flüssiges Wasser vorhanden ist. Die Kapillarkondensation setzt schon bei Luftfeuchten um 30% ein.

**Kapillar-
kondensation**

Die zeitliche Veränderung der Koexistenz von wasser- und luftgefüllten Poren einschließlich der Phasenumwandlungsprozesse (Verdunstung, Kondensation) wird von Simulationsprogrammen durch ein Feuchtespeichermodell beschrieben. Diese realitätsnahe Modellierung bringt auch eine Schwierigkeit mit sich: Es kann nicht das gesamte in flüssiger Form vorliegende Wasser als Kondensat aufgefasst werden. Als hygroskopischen Feuchtebereich definiert man daher den Bereich von 5% - 95% relativer Luftfeuchte. An der unteren Grenze des hygroskopischen Feuchtebereichs liegen die Bindungsenergien des absorbierten Wassers in der Größenordnung der thermischen Energien. Mit zunehmendem Feuchtegehalt (und relativer Luftfeuchte) werden der Betrag der Kapillarspannung und damit die Bindungsenergien geringer. Oberhalb von 95% relativer Luftfeuchte beschleunigt sich die Abnahme der Bindungsenergien überproportional, sodass man davon ausgehen kann, dass das Wasser nun als „nahezu“ freies bzw. frei bewegliches Wasser vorliegt (vergleiche auch *DIN 15148*). Das freie Wasser im Porensystem bezeichnet man auch als überhygroskopische Feuchte oder Kondensat bzw. Tauwasser, das stärker absorbierte Wasser nennt man hygroskopische Feuchte. Die Grenze zwischen beiden Feuchtebereichen wird durch den maximalen hygroskopischen Feuchtegehalt θ_{95} definiert. Oft wird auch der praktische Feuchtegehalt θ_{80} bei einer relativen Luftfeuchte von 80% als Materialparameter angegeben (siehe Abbildung 3.8).

**Definition der
Feuchtebereiche**

Während im hygroskopischen Bereich die Feuchtespeicherfunktion mit Salzlösungen ermittelt wird, wird sie im überhygroskopischen Bereich üblicherweise mit Hilfe von Druckplattenapparaturen bestimmt (siehe Abschnitt 2.4.3). Die gesamte Feuchtespeicherfunktion wird deshalb zweckmäßig in den hygroskopischen Bereich, die Sorptionsisotherme, und den überhygroskopischen Bereich, die Saugspannungskurve, unterteilt. Letztere wird nicht über der relativen Luftfeuchte sondern über dem Kapillardruck aufgetragen (siehe Abbildung 3.8).

**Feuchte-
speicherfunktion**



3 Bewertungskriterien

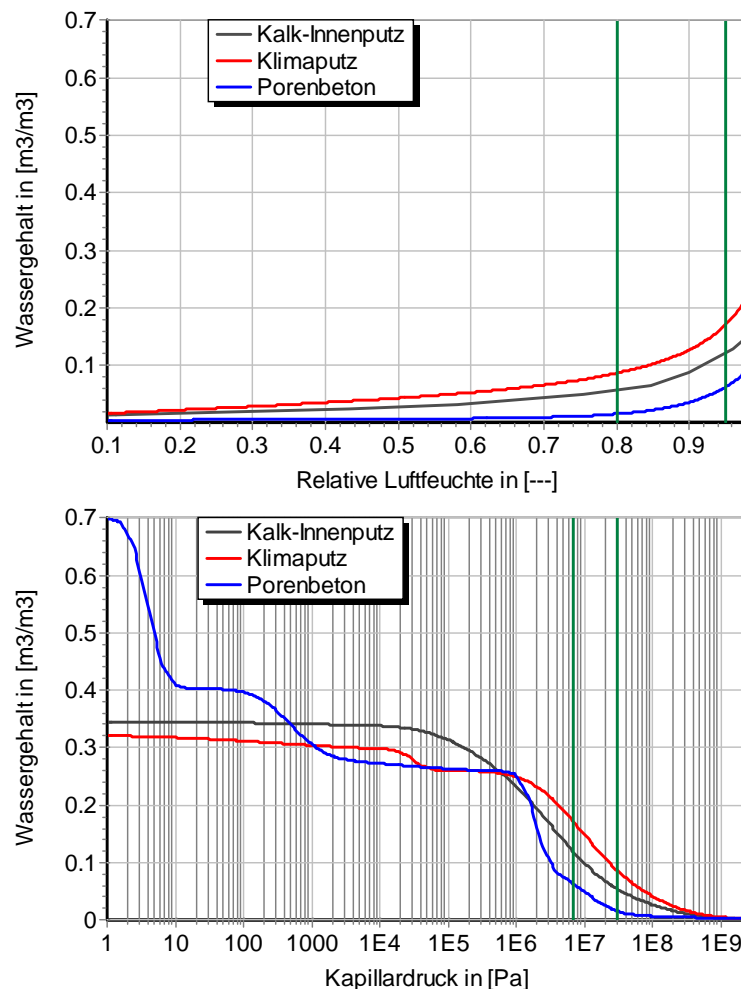


Abb. 3.8: Materialfunktionen verschiedener Materialien im Vergleich: oben Sorptionsisothermen, unten Saugspannungskurven. Die senkrechten Linien entsprechen jeweils 80% und 95% Luftfeuchte. Zusammen ergeben Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve die Feuchtespeicherfunktion.

Zeitlicher Verlauf der Transportprozesse

Die Bewertung von Umfassungskonstruktionen mit Hilfe der Simulation bildet den zeitlichen Verlauf der Transport- und Akkumulationsprozesse bezüglich Wärme und Feuchte ab. Diese Prozesse laufen unter dem Einfluss von definierten, sich üblicherweise zyklisch wiederholenden Klimabedingungen ab. Für die Simulationen ist die Festlegung von Anfangsbedingungen notwendig. In den vorliegenden Simulationen wurden eine relative Luftfeuchte von 80% und eine Temperatur von 10°C vereinbart. Der Anfangsfeuchtegehalt der Materialien entspricht dann dem praktischen Feuchtegehalt θ_{80} .

Soll eine Konstruktion mit einer erhöhten Anfangsfeuchte berechnet werden, z.B. durch Einbaufeuchte verursacht, muss im Zuge der Auswertung das erste bzw. müssen die ersten Jahre gesondert betrachtet werden. Diese Anfangssituation kann nicht durch stationäre Verfahren abgebildet werden.



Bei der Ergebnisdarstellung ist zu beachten, dass die Profile oder Kurvenverläufe nicht aller Dämmvarianten abgebildet werden können. Die kritischste Dämmvariante ist jeweils im Schaubild zu sehen, fehlende Varianten werden jeweils am Ende der Besprechung kurz schriftlich beurteilt.

Die DELPHIN-Ausgabe in Abbildung 3.9 zeigt ausgehend vom Anfangszustand die zeitliche Veränderung der integralen Feuchtemasse bzw. die jährlichen Kondensations- und Trocknungszyklen. Der Verlauf der integralen Feuchtemenge vermittelt einen Eindruck, wie schnell sich eine Konstruktion auf äußere Einflüsse einstellt. Aufbauten mit leichten, diffusionsoffenen Materialien reagieren im Allgemeinen schneller als massive, diffusionsdichte Konstruktionen. Die Einschwingdauer, d. h. die Zeitdauer, bis sich die integrale Feuchtemasse von Jahr zu Jahr nicht mehr ändert, ist in obigem Beispiel schon im dritten Jahr erreicht. Es ist aber möglich, dass dieser Vorgang noch nach 30 Jahren, der maximal durchgeführten Simulationsdauer, nicht vollständig abgeschlossen ist. Durchschnittlich niedrigere integrale Feuchtemengen im Vergleich zum Anfangszustand deuten auf eine geringere Feuchtebelastung hin. Allerdings kann erst die Untersuchung der örtlichen Verteilung der Feuchte in Verbindung mit den Materialfunktionen klären, ob wirklich von einer Schadensfreiheit ausgegangen werden darf.

Kondensatmengen ohne Schlagregeneinfluss

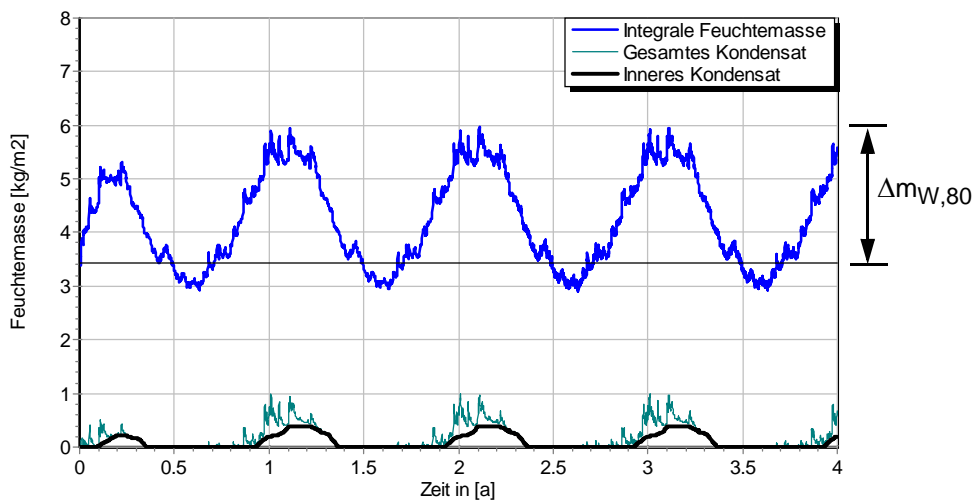


Abb. 3.9: Beispielwandaufbau in Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss: Verlauf der integralen Feuchtemasse, des gesamten und inneren Kondensats mit 80 mm Dämmung

Tab. 3.7: Ergebnistabelle für Beispielwandaufbau in Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	1,800	2,200	2,527
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,0	0,166	0,270	0,398

Zur Orientierung wird die Differenz zwischen der Wassermenge am Anfang der Simulation und der maximal auftretenden Wassermenge ($\Delta m_{w,80}$) im einge-



3 Bewertungskriterien

schwungenen, quasi-stationären Zustand angegeben. Dass diese Werte bei verschiedenen Konstruktionen zum Teil stark voneinander abweichen, liegt hauptsächlich an dem unterschiedlichem Speicherverhalten der Materialien: Massive Konstruktionen oder poröse Materialien vermögen mehr Wasser zu speichern als dünne Wände bzw. dichte Baustoffe.

Die grünblaue Linie in Abbildung 3.9 gibt den Verlauf der gesamten Kondensatmenge wieder. Sie beinhaltet auch Kondensat, das sich durch die nächtliche Auskühlung in den äußeren Schichten bildet (langwellige Abstrahlung). Das innere Kondensat (dicke schwarze Linie) bezeichnet dagegen nur Kondensat in den innen liegenden Schichten, d.h. im Innendämmsystem, dem alten vorhandenen Putz und der inneren Ziegel- oder Steinschicht. Sollte der Wandbildner nur aus einer Steinschicht oder beispielsweise aus Beton bestehen, umfasst das innere Kondensat nur das „freie Wasser“ in der inneren Hälfte des Wandbildners, also beispielsweise in der inneren Hälfte der Ziegelschicht. In Tabelle 3.7 sind die maximalen inneren Kondensatmengen dokumentiert. Bei Simulationen ohne Schlagregeneinfluss kann der Wert der inneren Kondensatmenge $m_{W,T,int}$ gut mit dem Grenzwert der *DIN 4108-3* verglichen werden.

Kondensatmengen mit Schlagregeneinfluss

Abbildung 3.10 gibt die Feuchtemengen mit Schlagregeneinfluss einer nach Westen ausgerichteter Fassade wieder. Die Kurven setzen sich deutlich von den Verläufen ohne Schlagregeneinfluss ab. Das Gros des eindringenden Regens wird in der äußeren Schicht gespeichert. Der extreme Anstieg am 15. Januar wird durch ein Regenereignis bei Temperaturen über 0°C verursacht. Eine höhere Feuchte verursacht nicht nur eine höhere Wärmeleitfähigkeit sondern auch eine höhere Flüssigwasserleitfähigkeit, sodass mehr eindringender Schlagregen schneller zur inneren Steinhälfte gelangt. Trotz der hohen Schlagregenbelastung trocknet der innere Bereich des Wandaufbaus im Sommer wieder aus. Eine Phase mit häufigen Regenfällen Ende November führt einen weiteren charakteristischen Anstieg herbei.

Bei den Maximalwerten des inneren Kondensats ist hier der Umstand berücksichtigt, dass auch in die unsanierte Konstruktion Schlagregen bis tief in die Konstruktion eindringen kann. Die orangefarbene Linie in Abbildung 3.10 kennzeichnet daher den Maximalwert bei der unsanierten Variante, der nur 0,141 kg/m² beträgt. Weil aber nur die Feuchtemenge erfasst werden soll, die zusätzlich durch das Dämmsystem verursacht wird, wird der Kondensat-Maximalwert der unsanierten Variante jeweils von dem Maximalwert der sanierten Variante abgezogen und in die Tabelle eingetragen. Die inneren Kondensatmengen aller unsanierten Varianten sind im Anhang aufgeführt.

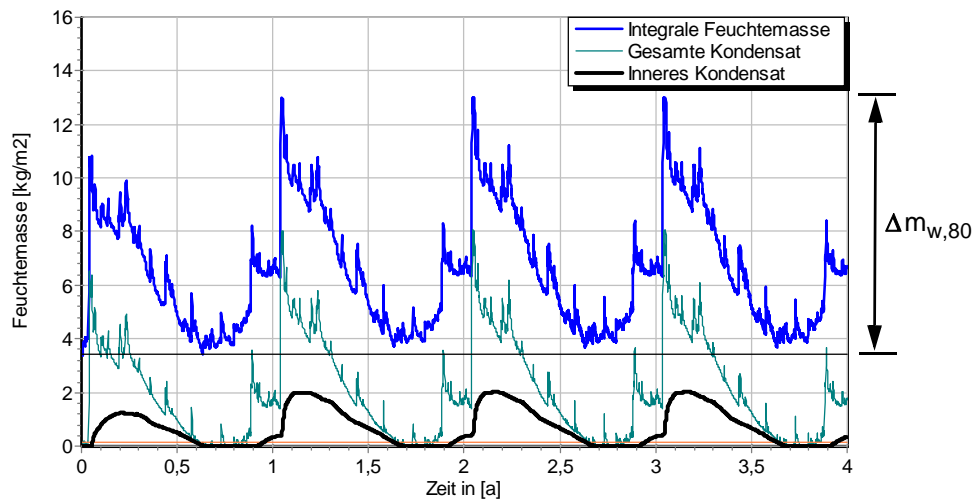


Abb. 3.10: Beispielwandaufbau in Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss: Verlauf der integralen Feuchtemasse, des gesamten und inneren Kondensats mit Schlagregen mit 80 mm Dämmung. Maximale innere Kondensatmenge der unsanierten Variante in orange.

Tab. 3.8: Ergebnistabelle für Beispielwandaufbau in Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	8,426	9,021	9,574
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	1,090*	1,628*	2,012*

Beim Vergleich mit Abbildung 3.9 fällt auf, dass trotz eines gemäß *DIN 4108-3* immerhin wasserhemmenden Kalkzementputzes die Feuchtemengen mit Schlagregeneinfluss sehr viel größer sind: Die integrale Feuchtemasse ist kurzzeitig mehr als doppelt so hoch, die maximale gesamte Kondensatmenge (jeweils türkisfarbene Linie) summiert sich mit 8 kg/m² zum ungefähr achtfachen und die maximale innere Kondensatmenge beträgt zeitweise um 2,0 kg/m²! Bei der Einschätzung der Feuchtemengen sollten jedoch folgende Punkte noch einmal in Erinnerung gerufen werden:

- In den Simulationen mit schlagregenexponierten Wandaufbauten wird immer die Ausrichtung mit der höchsten Schlagregenmenge gewählt, zusätzlich wird ein sehr hoher Übergangskoeffizient angeordnet.
- In Gebieten mit einer Schlagregenbeanspruchungsgruppe III (über 800 mm/a) empfiehlt die *DIN 4108-3* die Applikation eines wasserabweisenden statt eines wasserhemmenden Putzes.
- Bei einlagigen Konstruktionen (Breite des Wandbildners bei Ziegel 250 mm/240 mm, bei Kalksandstein 175 mm) gelangt eindringender Schlagregen relativ schnell in den „Bereich des inneren Kondensats“.
- Durch die Verwendung der Desorptionskurve bei der Feuchtespeicherung



3 Bewertungskriterien

(siehe Abschnitt 2.4.3) wird immer die maximal mögliche Menge an Kondensat ausgewiesen.

- Da immer die Speicherfunktionskurve mit dem maximalen Wassergehalt verwendet wird, erhöht sich zusätzlich auch die vom Wassergehalt abhängige Flüssigwasser- sowie die Wärmeleitfähigkeit.

Im Sinne einer allgemeinen Einschätzung auf der sicheren Seite ist die Verwendung dieser Sicherheitsfaktoren sinnvoll, bei der Untersuchung eines bestimmten Objektes sollten natürlich die Faktoren bezüglich Klima und Material den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Zum Vergleich: Eine gesättigte Ziegelwand von 250 mm Dicke kann ohne weitere Putzschichten oder Mörtel ca. 70 kg/m^2 flüssiges Wasser speichern; in Abbildung 3.10 werden ca. 8 kg/m^2 erreicht.

Bei einem ausreichenden Schlagregenschutz, beispielsweise durch geeignete Putze oder Fassadenelemente, unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen schlagregenexponierten und Simulationen ohne Schlagregen kaum. Um diesen Sachverhalt zu demonstrieren, wurde in einigen Simulationen wurde des wasserhemmenden Kalkzementputzes ein wasserabweisender Kunstharzputz angeordnet.

3.5.2 Wärmeverluste durch Transmission

Zur Bilanzierung der instationären Transmissionswärmeverluste durch das Bauteil werden die Wärmestromdichte und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft als zeitabhängige Größen ausgewertet. Der instationäre Wärmedurchgangskoeffizient kann nach Gleichung (3.15) als Quotient der Wärmestromdichte q_{HP} über die Innenoberfläche und der Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur $\theta_{i,HP} - \theta_{e,HP}$ definiert werden. Dabei fließen jeweils die zeitlichen Mittelwerte über die Heizperiode (HP) in die Berechnung ein.

$$U_{inst,HP} = \frac{q_{HP}}{\theta_{i,HP} - \theta_{e,HP}} = \frac{\int_{HP} q(t) \cdot dt}{\int_{HP} (\theta_i - \theta_e) \cdot dt} \quad (3.15)$$

Die Summe aus den Wärmeübergangswiderständen nach *DIN 6946* und dem Wärmedurchlasswiderstand entspricht dem reziproken U -Wert. Damit erhält man den instationären Wärmedurchlasswiderstand $R_{inst,HP}$ während der Heizperiode:

$$R_{inst,HP} = \frac{1}{U_{inst,HP}} - R_{si} - R_{se} \quad (3.16)$$

Für die Bestimmung einer durchgehenden Heizperiode wird zunächst der Verlauf der Außentemperaturen mit einer Cosinus-Funktion approximiert (schwarze Kur-



ve in Abbildung 3.11). Analog zur Vorgabe in der *EnEV 2007* wurden als Heizgrenztemperatur in der Auswertung 10°C festgelegt. Bezogen auf die TRY-Region 13 mit dem Referenzort Passau erstreckt sich dann die Heizperiode vom 8. Oktober bis zum 29. April und umfasst insgesamt 203 Tage.

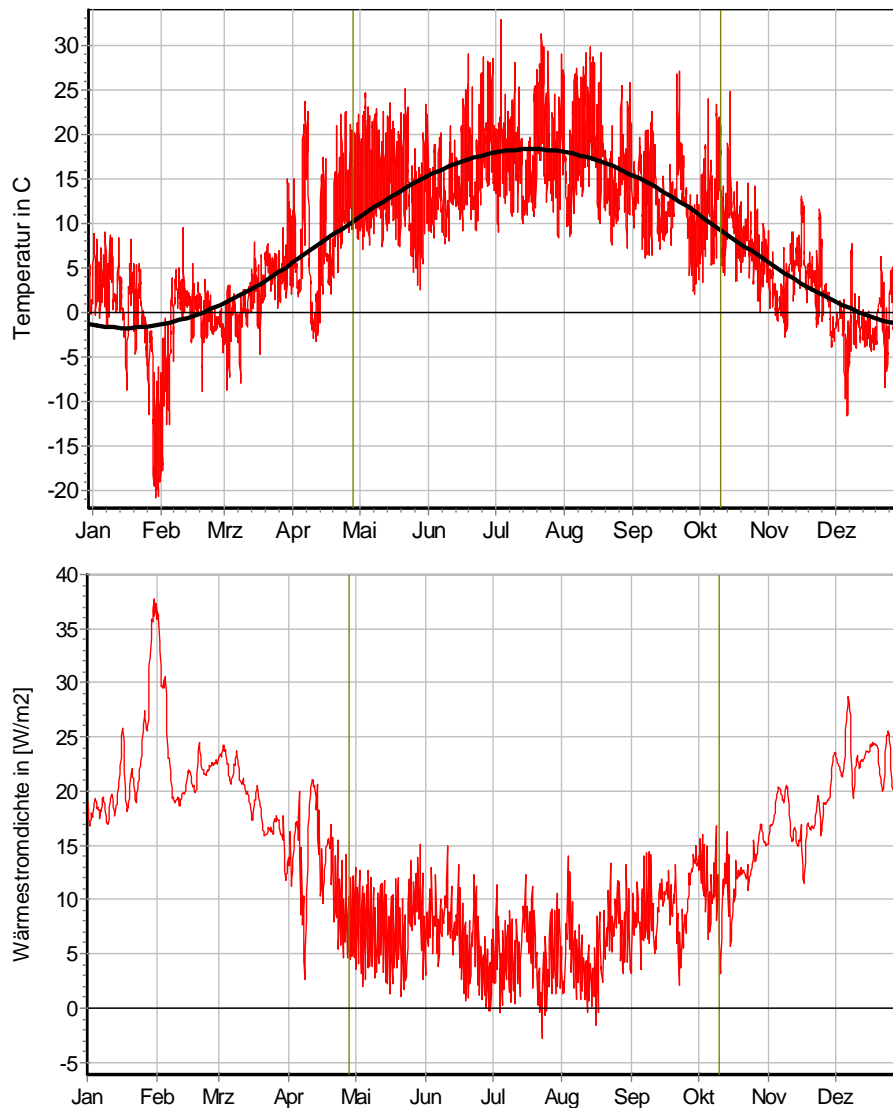


Abb. 3.11: Oben: Verlauf der Außentemperatur, approximiert durch eine Cosinus-Funktion. Unten: Jahresverlauf der Wärmestromdichte über die Wandinnenoberfläche (Nordausrichtung). Die vertikalen, ockerfarbenen Linien kennzeichnen den Anfang und das Ende der Heizperiode, 8. Oktober bis 29. April.

Neben der direkten Berechnung des U -Wertes aus den Wärmestromdichten ergeben sich zusätzliche Vorteile des instationären Verfahrens: Neben den bei schweren Wänden relevanten Wärmespeichervorgängen, der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit und solaren Gewinnen wird auch die langwellige Abstrahlung als Effekt mit berücksichtigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, regionspezifische Klimadaten zu berücksichtigen. Der instationäre U -Wert gibt



3 Bewertungskriterien

somit eine genauere Auskunft über die tatsächlich zu erwartende Größe der Transmissionswärmeverluste.

Tab. 3.9: Tabelle mit den mittleren Wärmestromdichten und den berechneten U - und R -Werten während der Heizperiode vom 29. April bis 8. Oktober

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	18,73	14,41	10,68
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	1,06	0,82	0,61
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,77	1,05	1,48

Die so ermittelten Werte für den Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmedurchlasswiderstand weichen von den Ergebnissen der vereinfachten stationären Verfahren ab (siehe Tabellen 3.4 und 3.5), wobei sich die auf die DIN-Werte bezogene prozentuale Änderung mit der Dicke der Dämmschicht vergrößert. Ein direkter Vergleich zeigt, dass für den Beispielwandaufbau eine Erhöhung des U -Wertes um 4.2%, 6.0%, 6.5% und 7.0% für die unsanierte Variante und die Dämmvarianten 30/50/80 mm zu verzeichnen ist.

3.5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

Temperatur und Feuchte auf Wandoberfläche

Das wandnahe Mikroklima, d.h. die zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf der Innenwandoberfläche, lässt sich mit Hilfe der hygrothermischen Simulation berechnen. Aus der Kenntnis des Mikroklimas auf der Innenwandoberfläche kann dann auf die Gefahr einer Auskeimung von Schimmelpilzen geschlossen werden, da ein „günstiges“ Mikroklima eine notwendige Bedingung für das Schimmelwachstum darstellt.

Die Kurven der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf der Wandoberfläche in Abbildung 3.12 lassen auch eine Einschätzung zu, ob durch einen geringen Wärmedurchlasswiderstand von Wand- oder Dachaufbauten ein thermischer Discomfort zu erwarten ist. Bis zu drei Kelvin Differenz zwischen Raumlufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsfläche gelten als optimal, bis zu fünf Kelvin Differenz - dies wäre bei einer Raumtemperatur von 20°C eine Wandoberflächentemperatur von 15°C - werden als erträglich eingestuft (Roloff 2007).

Einfluss der Wandausrichtung

Meistens ist die Situation in Gebäudewinkeln oder anderen konstruktiven Details kritischer als im ungestörten Bereich. Deshalb wird der Bereich des Gebäudewinkels analysiert. Hier ist der kritischste Fall der Nordwestwinkel: Die Ausrichtung mit der niedrigsten Sonneneinstrahlung trifft dort auf die Fassade mit der höchsten Schlagregebelastung. Aus Abbildung 3.13 lässt sich entnehmen, dass es im Winkel zur Auskeimung von Schimmelpilzsporen kommen würde, bedingt durch den geringen Wärmewiderstand von 30 mm Dämmung, wegen der geometrischen Wärmebrücke und auf Grund des niedrigeren Übergangskoeffizien-



ten, reichen die 30 mm dicken Dämmplatten eindeutig nicht aus, um Feuchteschäden zu verhindern (Abbildung 3.13).

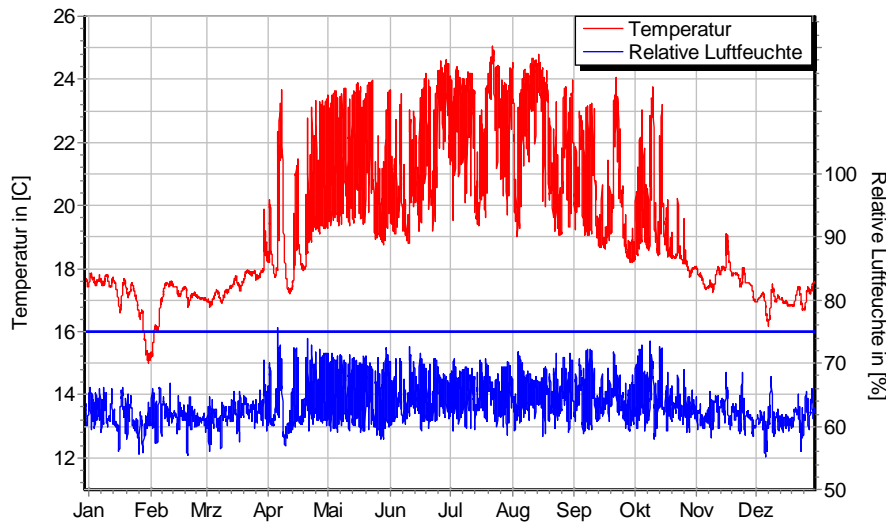


Abb. 3.12: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf der Wandinnenoberfläche mit 30 mm Dämmung (blaue Linie bei 75% relativer Luftfeuchte, Nordausrichtung, ohne Schlagregen)

Auf bauüblichen Materialien kann erst ab einer Luftfeuchte von $\varphi_{si} = 75\%$ Schimmelpilzwachstum (WTA-Merkblatt 6-3-05) auftreten. Die zusätzlich abgebildete Gerade bei 75% Luftfeuchte in Abbildung 3.12 dient deshalb der Orientierung. Für die Bewertung des Schimmelpilzrisikos ist es zunächst ausreichend, den Verlauf der relativen Luftfeuchte auf Überschreitungen des 75%-Wertes zu überprüfen. Ist das nicht der Fall, kann, nur für die untersuchte Fläche bzw. Position, Schimmelgefahr unter den angenommenen Nutzungsbedingungen ausgeschlossen werden.

Wird der Grenzwert von $\varphi_{si} = 75\%$ überschritten, ist der Temperaturverlauf mit in die Bewertung einzubeziehen, da Auskeimung und Wachstum von Schimmelpilzen auch stark von der Temperatur abhängig sind. In Abbildung 3.13 ist deshalb der Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte über der Temperatur aufgetragen worden. Jedes Kreuz stellt einen Zwölf-Stunden-Mittelwert des Wertepaares Luftfeuchte über Temperatur dar. Dieser Zeitintervall wurde gewählt, weil kürzere Überschreitungen der Grenze für Keimung normalerweise noch kein Schimmelpilzwachstum verursachen können.

Die durchgezogenen Linien in Abbildung 3.13, die Isoplethen, stellen Grenzwerte für die Auskeimung dar. Isoplethen sind Linien gleichen Wachstums und gestatten eine Einschätzung, wie wahrscheinlich die Auskeimung von Schimmelpilzen auf der Wandoberfläche ist. Würden sich zum Beispiel die kombinierten Werte von Temperatur und Luftfeuchte länger als 16 Tage genau auf dem Isoplethen

Vergleich mit Isoplethen für Schimmelpilze



3 Bewertungskriterien

für Auskeimung nach 16 Tagen bewegen (Abbildung 3.13, schwarze Linie), würde es tatsächlich zu einer Auskeimung kommen.

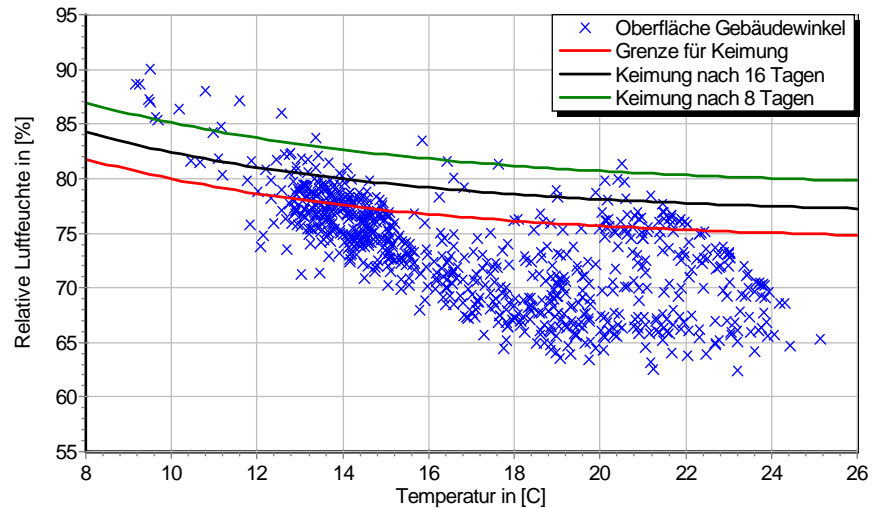


Abb. 3.13: Beispielkonstruktion mit 30 mm Dämmung: Temperatur- und Luftfeuchtwerte im Gebäudewinkel (Nordwestwinkel, mit Schlagregen) gegen Isolethen (Linien gleichen Wachstums) aufgetragen.

Nach der Auswertung der Simulationen mit den verschiedenen Dämmdicken wird deutlich, dass erst eine 50 mm dicke Wärmedämmung (Abbildung 3.14) eine ausreichende Sicherheit gegen organisches Schädlingwachstum bietet. Die Grenze für Keimung (LIM) wird zwar mehrere Male überschritten, jedoch ist die Dauer der Überschreitungen nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen.

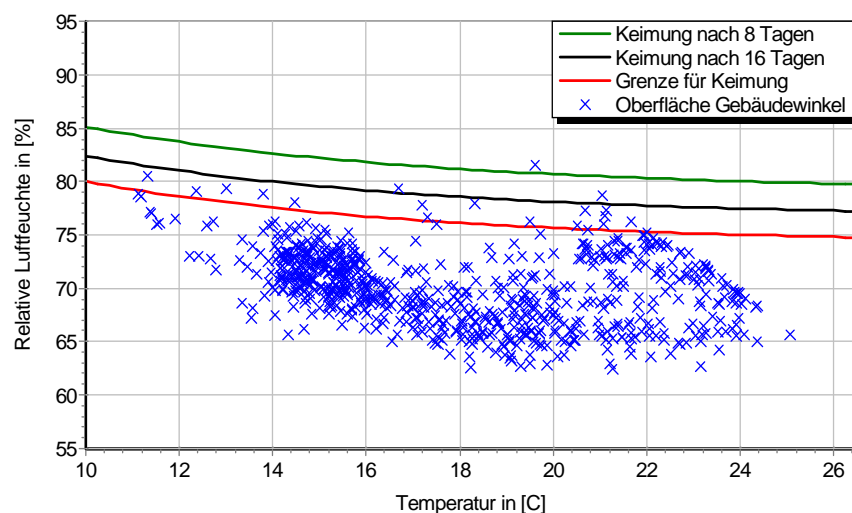


Abb. 3.14: Beispielkonstruktion mit 50 mm Dämmung: Temperatur- und Luftfeuchtwerte im Gebäudewinkel (Nordwestwinkel, mit Schlagregen).



3.5.4 Temperatur- und Feuchteprofile, Frost-Tauwechsel

Neben den bauphysikalischen Verhältnissen auf Innenwandoberflächen sind auch die Verteilungen der Feuchte und Temperatur im Wandquerschnitt von Interesse. Die Abbildungen der Temperatur- und Luftfeuchteprofile zeigen charakteristische Verteilungen, die im Jahresverlauf auftreten. Dazu gehören die maximalen, minimalen und die durchschnittlichen Profile. Bei der Darstellung der Temperatur- und Luftfeuchteprofile deuten die vertikalen schwarzen Striche die Grenzen der Materialschichten an.

In Abbildung 3.15 sind die im Jahresverlauf maximalen und minimalen Temperaturprofile dargestellt. Zusätzlich ist auch das minimale Temperaturprofil der ungedämmten Variante in oranger Farbe eingefügt. Der Vergleich der minimalen Temperaturprofile vor und nach Anbringung einer Innendämmung verdeutlicht die Temperaturerhöhung auf der neuen inneren Wandoberfläche und die Temperaturabsenkung in der bestehenden Wandkonstruktion. Die Auskühlung der Wandkonstruktion kann zu einer Verminderung des Trocknungspotentials führen und die Frostgefahr erhöhen.

Temperaturprofile

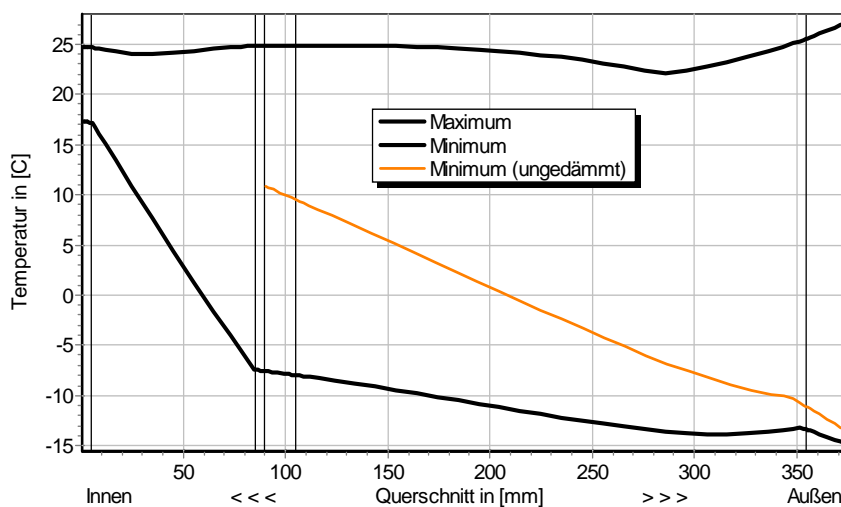


Abb. 3.15: Beispielkonstruktion (80 mm Dämmung, Nordseite, ohne Schlagregen): Minimale und maximale Temperaturen sowie die minimalen Temperaturen der ungedämmten Wand in orange

Zwischen Simulationen mit und ohne Einwirkung von Schlagregen sind beim Temperaturprofil meistens nur marginale Unterschiede auszumachen, weswegen meistens (Ausnahme: Teil II Wandaufbauten 6.5 und 6.6) nur die nach Norden ausgerichtete Wand ohne Schlagregen abgebildet wird.

Die Feuchteprofile in Abbildung 3.16 werden als Profile der relativen Luftfeuchte ausgewiesen. Anhand des Feuchteprofils wird illustriert, wie weit sich die Feuchte der Innenoberfläche nähern kann, was gemeinhin als „Durchschlagen“ bezeichnet wird. Das durchschnittliche Profil gewährt eine Einschätzung, ob sich

Luftfeuchteprofile



3 Bewertungskriterien

die relative Luftfeuchte vornehmlich am maximalen oder minimalen Profil bewegt.

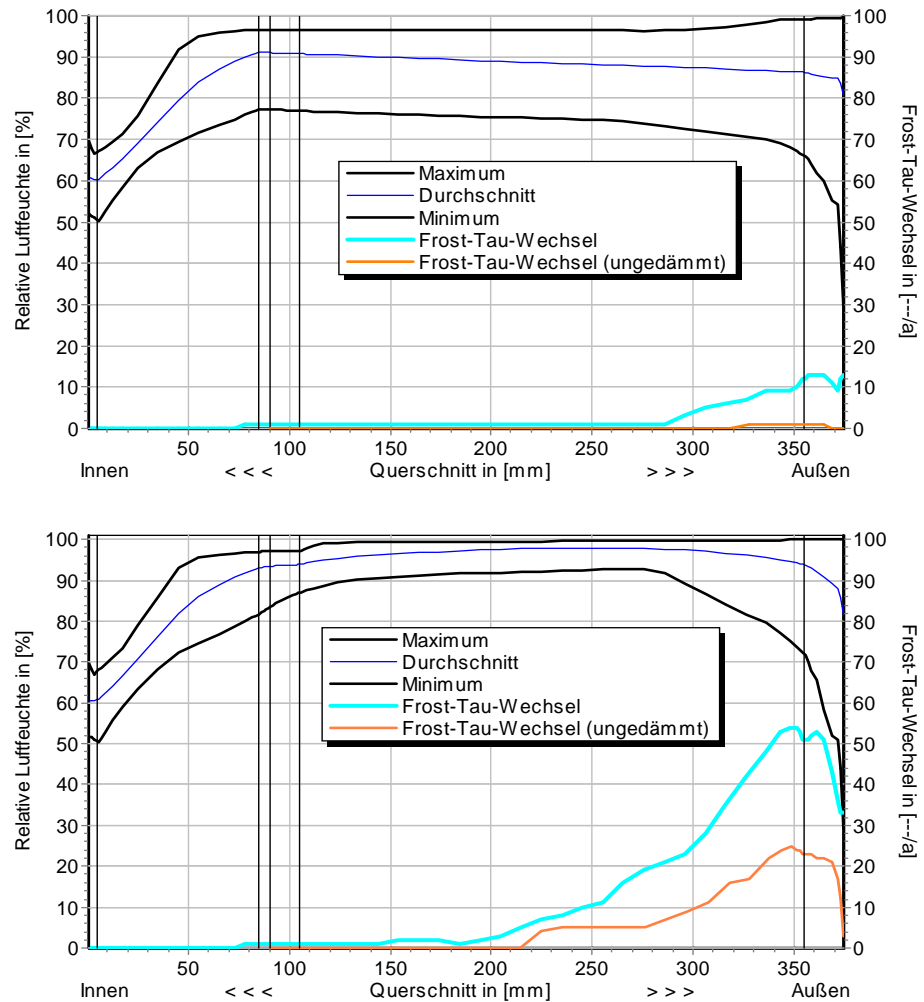


Abb. 3.16: Beispielkonstruktion (80 mm Dämmung, Westseite): Charakteristische Luftfeuchtep Profile im Verlauf eines Jahres sowie das Profil der Frost-Tau-Wechsel, Oben: ohne Schlagregen, Unten: mit Schlagregen

Die Luftfeuchtep Profile zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Schlagregeneinfluss. Bei dem Vergleich der zeitlichen Verläufe der integralen Feuchtemassen (Abbildungen 3.9 und 3.10) war bereits absehbar, dass die Luftfeuchtep Profile mit Schlagregeneinfluss höher liegen werden. Abbildung 3.16 illustriert, dass bei sehr hohem Schlagregeneintrag der gesamte Mauerwerksziegel immer wieder hoher Feuchte über 95% ausgesetzt wird. Zur kapillaraktiven Innendämmung hin fällt das Feuchteniveau zunächst leicht, in der Innendämmung dann jedoch stetig ab.

Frost-Tauwechsel

Das Profil mit der Anzahl der jährlichen Frost-Tau-Wechsel (FTC) ist in das Schaubild der Luftfeuchtep Profile integriert. Die Berechnung der jährlichen FTC erfolgt durch Auswertung der Temperatur und Wassergehaltsprofile. Dazu wird



zunächst die Gefrierpunkttemperaturabsenkung nach dem Modell von Xu 1999 in Abhängigkeit vom Wassergehalt berechnet. Unterschreitet die Temperatur an einem Punkt die Gefrierpunkttemperatur und steigt dort später wieder über 0°C wird dies als ein Frost-Tau Wechsel registriert.

Die FTC müssen sich im Falle einer Innendämmung nicht zwangsweise ausschließlich nahe der Außenoberfläche befinden. Bereits auf der kalten Seite der Dämmschicht kann es zu einem höheren Feuchtegehalt kommen, sodass bei gleichzeitig niedrigen Temperaturen auch dort FTC prinzipiell möglich sind, wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist. Nahe der Oberfläche sind die strukturellen Voraussetzungen für Materialabspaltungen gegeben, z. B. durch den geschwächten Verbund des Deckputzes mit der darunter liegenden Schicht oder durch schon vorhandene, kleinere Risse. Sinnvoll ist bei den Frost-Tau-Wechseln ist der Vergleich mit anderen Sanierungsvarianten, welcher eine Einschätzung gestattet, inwieweit durch die Baumaßnahme die Gefahr von Frostschäden *potentiell* erhöht wird.

3.5.5 Belastungskennzahlen für biologische Schädigung

Die Sicherung einer wirtschaftlich sinnvollen Nutzungsdauer von Gebäuden beinhaltet auch die Vermeidung von Schäden durch biologischen Befall (Schimmelpilze, Schwämme, Algen, Flechten). Die Kenntnis von Feuchte- und Temperatur als orts- und zeitabhängige Größen kann in diesem Zusammenhang nützliche Anhaltspunkte liefern. Der Grundgedanke besteht darin, notwendige physikalische Bedingungen für das Entstehen von Schäden auszuschließen oder zu reduzieren, um die Schadenswahrscheinlichkeit zu senken. Durch vergleichende Analyse von Konstruktionsvarianten sollen die Schadensrisiken minimiert werden. Dazu war es notwendig, neue Belastungskennzahlen einzuführen.

Bei organischen Materialien, wie Holz oder Holzwerkstoffen, wurden die Bedingungen untersucht, unter denen die Baustoffe in der Konstruktion mit zerstörenden Organismen, allen voran der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), befallen werden können. Der Echte Hausschwamm gilt wegen seiner Verbreitung, Zähigkeit und wegen seines Zerstörungspotentials als gefährlichster und effektivster biologischer Schädling. Gleichzeitig sind seine Anforderungen an die Baufeuchte vergleichsweise gering. Leider existieren für den Echten Hausschwamm derzeit noch keine vergleichbaren Untersuchungen wie für das Schimmelpilzwachstum auf Wandoberflächen. Jedoch bestehen auch für diesen Schädling limitierende Faktoren für Auskeimung und Wachstum. Durch die Auswertung des Feuchteangebotes und der Temperatur können Kenndaten ermittelt werden, der einen qualitativen Vergleich verschiedener Varianten zulassen.

**Pilzbefall,
Hausschwamm**

Die Angaben, ab welcher Temperatur das Wachstum von Echtem Hausschwamm beginnt, schwanken zwischen 3°C und 5°C (Sutter 2007, Colling 2000, Müller 2005). Für den Feuchtegehalt in Bauholz wird häufig angegeben, dass 20 Massenprozent langfristig nicht überschritten werden sollten (Mönck &



3 Bewertungskriterien

Erler 2004, DIN 68800-3, WTA 8-1-03). Dabei handelt es sich allerdings um einen Wert auf der sicheren Seite, der nur gültig ist, wenn schon ein großer Bereich befallen wurde und der Pilz seine „eigene Wasserversorgung“ aufbauen konnte. Dagegen muss für das anfängliche Auskeimen und auch für die eigentliche Zerstörung des Holzes der Fasersättigungspunkt des Holzes erreicht sein (Sutter 2007, Colling 2000, Müller 2005). Dieser bewegt sich bei bauüblichen Hölzern zwischen 28 und 30 Masseprozent. Der Belastungskennwert $t_{PGV, 20}$ bzw. $t_{PGV, 26}$ (PGV = Possible Growth of Vermins/mögliches Schädlingswachstum) summiert deshalb die Zeit auf, bei welcher der Wassergehalt des organischen Materials in der Konstruktion über 20 bzw. 26 Masseprozent liegt und gleichzeitig eine Temperatur über 2°C gegeben ist.

$$t_{PGV, XX} = \text{Dauer}((w > XX \%) \wedge (\theta > 2^\circ\text{C})) \quad (3.17)$$

Für die Auskeimung von biologischen Schädlingen ist die Zeitspanne besonders wichtig, in der die Voraussetzungen für Keimung durchgängig gegeben sind. Deshalb wird mit $t_{PGV, 20, max}$ bzw. $t_{PGV, 26, max}$ auch die jährliche, maximale Zeitdauer angegeben, in der die Grenzwerte für Wassergehalt und Temperatur durchgehend überschritten werden.

$$t_{PGV, XX, max} = \text{MaxDauer}((w > XX \%) \wedge (\theta > 2^\circ\text{C})) \quad (3.18)$$

Die Verwendung einer solchen Belastungskennzahl hat Vorteile: Da die Information über die zeitliche und örtliche Verteilung von Feuchte w und Temperatur θ zur Verfügung steht, kann die Auswertung von (3.17) und (3.18) auf besonders kritische Punkte in der Konstruktion, z.B. Anschlussdetails, fokussiert werden. Allerdings gibt es auch Einschränkungen: Die Belastungskennzahl t_{PGV} charakterisiert lediglich physikalische Belastungsgrößen. Sie beinhaltet keine Informationen über die materialspezifische Anfälligkeit für Pilze und Schwämme; es wird z.B. nicht zwischen verschiedenen Holzsorten oder anderen organischen Materialien unterschieden und chemischer oder sonstiger Schädlingsschutz wird nicht berücksichtigt.

Pilze, Algen und Flechten

Mit der Erhöhung der Wärmedämmstandards kann verstärkt biologisches Wachstum auf Außenoberflächen in Form von Pilzen, Algen und Flechten registriert werden. Die durch die Wärmedämmung und die langwellige Abstrahlung bedingten, niedrigeren Temperaturen in den äußeren Schichten führen dort zu erhöhten Luftfeuchten und häufigerer Unterschreitung der Taupunkttemperatur. Dieser Effekt wird durch das geringere Wärmespeichervermögen von dünnen, äußeren Putzschichten bei WDVS-Systemen begünstigt. Nutznießer sind die genannten biologischen Organismen, deren Wachstumsbedingungen durch die höhere Feuchte verbessert werden. Auf diesen Zusammenhang weist inzwischen



eine Reihe von Veröffentlichungen hin, die diese Problematik untersuchen: z. B. *Fitz et al. 2007* oder *Raschle & Büchli 2006* oder *Venzmer et al. 2008*.

Für die Abschätzung der Neigung einer Konstruktion zu Pilz- und Algenbefall kann die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche Hinweise liefern.

$$t_{cond,e} = \text{Dauer} \left((\varphi_{se} > 98 \%) \wedge (\theta_{se} > 0^\circ\text{C}) \right) \quad (3.19)$$

Sie erlaubt einen Vergleich der Wahrscheinlichkeit von biologischem Wachstum bei verschiedenen Konstruktionsvarianten: Je länger frei verfügbares Wasser vorhanden ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Algen, Pilze oder Flechten auftreten. Die kumulierte Kondensationsdauer beinhaltet deshalb die Zeitspanne, bei der die relative Luftfeuchte über 98% und gleichzeitig die Temperatur über 0°C verläuft.

3.5.6 Belastungskennzahlen für mechanische Schädigung

Die Sicherung einer wirtschaftlich sinnvollen Nutzungsdauer von Gebäuden beinhaltet auch die Vermeidung von Schäden durch mechanische Belastungen infolge klimatischer Einflüsse (Verwitterung, Rissbildung). Der Bewertung liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sowohl zeitliche als auch örtliche Änderungen von Feuchte und Temperatur zur mechanischen Schädigung beitragen können. Zeitliche Änderungen bewirken hygri-sches Quellen und Schwinden und thermische Dehnungen. Dadurch kann es selbst bei nicht starr verbundenen Materialschichten zu Spannungsaufbau im Porengefüge kommen. Mikrorisse und Absandung können die Folge sein. Bei starr verbundenen Materialschichten (z.B. Putz auf Ziegel) sind zusätzlich die Unterschiede in den Formänderungen benachbarter Materialschichten zu beachten, die sich für die Induktion von Scherspannungen verantwortlich zeichnen. Auch innerhalb einer homogenen Materialschicht können Scherspannungen auf diese Weise erzeugt werden, was zum Abriss von Schichten führen kann. Aus diesem Grund werden neben den Zustandsgrößen Feuchte und Temperatur auch deren Gradienten im oberflächennahen Bereich in die Auswertung einbezogen.

Die hygrothermischen Verwitterungs- und Rissinduktionsbelastungskennwerte sind ein Maß für die durch Temperatur- und Feuchteänderungen hervorgerufenen mechanischen Zerstörungen der äußeren Materialschichten. Dafür werden die Kurvenlängen von Temperatur, Luftfeuchte oder Wassergehalt bzw. deren Gradienten im Oberflächenbereich aufsummiert. Das heißt, die Wegstrecke, die z. B. der Temperaturverlauf in einem Jahr zurücklegt, wird hierfür mit berücksichtigt. Dabei werden sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der „Temperaturschwingung“ erfasst. Ein Temperaturverlauf mit großen Differenzen zwischen Tageshöchst- und den tiefsten Temperaturen in der Nacht oder mit häufigeren Temperaturwechseln führt zu einer größeren Kurvenlänge als gleichmäßigere



3 Bewertungskriterien

Oberflächentemperaturen. Bei diesen Belastungskennzahlen wurde das Intervall für die Ausgabezeitschritte einheitlich auf eine Stunde festgelegt. Alle ermittelten Kurvenlängen werden jeweils auf die unsanierte Variante bezogen und in Prozent ausgedrückt.

Bei mechanischen Belastungskennzahlen wird immer der Bezug auf die jeweilige unsanierte (vorhandene) Konstruktion hergestellt. Auf diese Weise können Sanierungsvarianten mit unterschiedlichen Materialien bzw. Dämmsystemen verglichen werden. Aufbauten mit unterschiedlichen Wandbildnern, z.B. Kalksandstein und Ziegel, lassen sich hingegen nicht vergleichen.

Verwitterung

Die hygrothermischen Witterungsbelastungskennzahlen, WL_{θ} und WL_w (WL = Weathering Load) integrieren die Kurvenlänge des jährlichen Temperatur- bzw. Wassergehaltsverlaufs auf der Außenoberfläche. Ein häufiger wechselhafter Verlauf von Temperatur und Feuchte auf der äußeren Bauteiloberfläche resultiert in einer längeren Kurve.

$$WL_{\theta} = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{\Delta\theta_{se,i}^2 + \Delta t_i^2} \quad \begin{array}{l} \text{thermische} \\ \text{Witterungsbelastung} \end{array} \quad (3.20)$$

$$WL_w = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{\Delta w_{se,i}^2 + \Delta t_i^2} \quad \begin{array}{l} \text{hygrische} \\ \text{Witterungsbelastung} \end{array} \quad (3.21)$$

$\Delta\theta_{se,i}^2$ Temperaturdifferenz über das Zeitintervall Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)

$\Delta w_{se,i}^2$ Wassergehaltsdifferenz über das Zeitintervall Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)

Die hygrothermische Witterungsbelastung gestattet Rückschlüsse auf die Häufigkeit und Intensität von hygrischen Quell- und Schwindvorgängen sowie thermischen Dehnprozessen.

Rissinduktion

Die hygrothermischen Rissinduktionsbelastungskennzahlen CIL_{θ} und CIL_{φ} (CIL = Crack Induction Load/Rissinduktionsbelastung) integrieren die Kurvenlänge des jährlichen Verläufen der Temperatur- bzw. Wassergehaltsunterschiede in den oberflächennahen Bereichen.

$$CIL_{\theta} = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{(\Delta(\overline{\theta}_{se,i} - \overline{\theta}_{xmm,i}))^2 + \Delta t_i^2} \quad (3.22)$$

$$CIL_{\varphi} = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{(\Delta(\overline{\varphi}_{se,i} - \overline{\varphi}_{xmm,i}))^2 + \Delta t_i^2} \quad (3.23)$$

$\Delta(\overline{\theta}_{se,i} - \overline{\theta}_{xmm,i})$ Differenz des gemittelten Temperaturgradienten zwischen der Außenoberfläche und in x mm Tiefe über Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)



$\Delta(\overline{\varphi_{se,i}} - \overline{\varphi_{xmm,i}})$ Differenz des gemittelten Luftfeuchtgradienten zwischen der Außenoberfläche und in x mm Tiefe über Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)

Ist beispielsweise ein Deckputz von auf einem Altbauziegel aufgebracht, wird der jährliche Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Außenoberfläche und Materialschichtgrenze bewertet. Besteht die äußerste Materialschicht beispielsweise aus einem Mauerziegel, wird der Verlauf in einer Tiefe von ungefähr 10 mm eingesetzt. Eine hohe Differenz von Temperatur und Wassergehalt in unterschiedlichen Tiefen weist auf eine erhöhte Gefahr von Ablösungen bzw. Absprengungen der obersten Materialschicht hin.

3.5.7 Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion

Die Ergebnisse der Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion wurden in Tabelle 3.10 für die Berechnungen ohne und mit Schlagregeneinfluss zusammengefasst. Dokumentiert werden die biologischen und mechanischen Belastungskennzahlen, wie die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche und die hygrothermische Witterungs- und Rissinduktionsbelastung. Da bei der untersuchten Beispielkonstruktion keine Materialien vorliegen, welche durch organische Schädlinge wie den *Echten Hausschwamm* befallen werden könnten, bleiben die Zeilen für das mögliche Schädlingswachstum unbesetzt.

Tab. 3.10: Belastungskennzahlen für Beispielkonstruktion mit Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss (oben), Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss (unten)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$ $t_{PGV,26/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	13	20	28
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ} WL_w	%	100	97,4	96,8	96,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ} CIL_{φ}	%	100	103,9	103,6	103,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{φ}	%	100	97,8	97,5	96,0
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$ $t_{PGV,26/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	24	40	48	53
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ} WL_w	%	100	98,1	97,5	96,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ} CIL_{φ}	%	100	105,4	107,1	108,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ} CIL_{φ}	%	100	98,3	97,2	96,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{φ}	%	100	106,4	109,1	109,2



3 Bewertungskriterien

Diskussion der Ergebnisse

Tabelle 3.10 dokumentiert deutlich, wie die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenwandoberfläche sowohl ohne als auch mit Regenbelastung mit der Dämmstoffdicke zunimmt. Die Innendämmung führt zu einer kälteren Außenoberfläche, die häufiger den Taupunkt unterschreitet, obwohl die massive Wandkonstruktion außen liegt. Bei einer Außendämmung mit geringer äußerer Wärmekapazität dürfte dieser Effekt noch etwas größer sein.

Die hygrothermische Witterungsbelastung der Variante ohne Schlagregen entwickelt sich dagegen positiv. Die Temperatur- und Feuchteamplituden auf der Wandoberfläche nehmen mit zunehmender Dämmstoffdicke ab. Besonders die Feuchteschwankungen werden kleiner. Insgesamt sind die Änderungen der mechanischen Belastungskennzahlen bei Anwendung der Innendämmung moderat. Das Beispiel Wärmedämmverbundsystem aus Teil II zeigt, dass bei Außendämmung größere Änderungen zu erwarten sind.

3.5.8 Bewertung der Simulationsergebnisse

Mindestwärmeschutz, Kondensat

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt, soweit möglich, analog zu den Nachweisen der stationären Berechnungen. Bezüglich des Mindestwärmeschutzes, der Überschreitung der zulässigen Kondensatmenge und Verdunstung des Kondensats werden identische Grenzwerte wie in den stationären Berechnungen angelegt, wobei sich die Verdunstung nur auf das Abtrocknen des inneren Kondensats bezieht.

Die gedämmten, schlagregenexponierten Westwände (Tabelle 3.11 unten) enthalten zu hohe Kondensatmengen, was auch auf die unter Abschnitt 3.3.3 erwähnten Annahmen und Randbedingungen zurückgeführt werden kann. Trotz der hohen Kondensatmenge verdunstet das gesamte innere Kondensat während der warmen Witterungsperiode auch in allen westorientierten Konstruktionen (siehe Abbildung 3.10).

Schimmelpilzkriterium

Die Bedingung für das Schimmelpilzkriterium unterscheidet sich durch die Einbeziehung der Temperatur und durch die Verwendung der Isolethen von den bisherigen Anforderungen. Für das Schimmelpilzkriterium wird ein weiteres Symbol eingeführt (Tabelle 3.11 unten). Der gelbe Kreis bedeutet, dass zwar die Bedingung $\varphi_{si}(\theta)_{Co} < LIM$ nicht eingehalten wurde, die Dauer der Überschreitungen des LIM allerdings nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen war.

Frost-Tau-Wechsel, Belastungskennzahlen

Für die in Abbildung 3.16 dokumentierten Frost-Tau-Wechsel und die Belastungskennzahlen aus Tabelle 3.10 existieren bisher keine Grenzwerte für die Simulationsergebnisse. Da aber der Quervergleich von Konstruktionsvarianten

3 Bewertungskriterien



möglich ist, können diese Ergebnisse als zusätzliche Entscheidungshilfe bei der Bewertung mit herangezogen werden.

Tab. 3.11: Bewertung der Simulationsergebnisse der Beispielkonstruktion. Oben: Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss. Unten: Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss.

Ohne Schlagregen (Nord)		Bedingung	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz		$\varphi_{s,f}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)		Bedingung	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand	$\varphi_{s,f}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,f}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

Eine abschließende Zusammenfassung in einer kleinen Matrix in Tabelle 3.12 komprimiert die Ergebnisse der Berechnungsverfahren nach DIN, COND (Tabelle 3.6) und DELPHIN (Tabelle 3.11) für die verschiedenen Dämmstoffdicken. Für das untersuchte Beispiel ergeben sich in Abhängigkeit vom Verfahren unterschiedliche Bewertungen: Gemäß den Nachweismethoden der *DIN 4108* wäre jede der Konstruktionen abzulehnen - auf Grund des Mindestwärmeschutzes und/oder der zu hohen Kondensatmengen. Das COND-Verfahren und die Simulationsergebnisse lassen immerhin die 80 mm dicke Dämmvariante zu, alle anderen Konstruktionen bestehen die Anforderung des Mindestwärmeschutzes nicht.

Abschließende Zusammenfassung

Tab. 3.12: Abschlussbewertung der Konstruktionen, getrennt nach Bewertungsverfahren und Klimabedingungen

	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
DELPHIN - ohne Schlagregen	■	■	■	■
DELPHIN - schlagregenexponiert	■	■	■	■

Das grüne Recheck bescheinigt, dass alle hier diskutierten Nachweise mit dem gewählten Verfahren erbracht werden konnten. Ein rotes Recheck weist darauf hin, dass maßgebliche Anforderungen des jeweiligen Bewertungsverfahrens



3 Bewertungskriterien

nicht erfüllt worden sind und die Konstruktion für eine Ausführung unter den gewählten Bedingungen nicht geeignet ist. Die gelbe Markierung zeigt an, dass die Anforderungen unter den schlagregenexponierten Bedingungen, einem „worst case“-Szenario, nicht eingehalten werden konnten. Allerdings kann die Konstruktion unter weniger ungünstigen Randbedingungen durchaus funktionieren und sollte daher nicht grundsätzlich verworfen werden.

3.5.9 Hinweise für den Konstruktionskatalog

Im Rahmen des Projektes „Feuchteatlas“ wurde die hier an einem Beispielwand-aufbau gezeigte Vorgehensweise auf einen Katalog von Konstruktionen angewendet. Zum Verständnis und zur Handhabung des Konstruktionskataloges seien hier noch einige Hinweise angebracht.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse hygrothermischer Simulationen und die daraus getroffenen Schlussfolgerungen sind immer nur für die jeweils verwendeten Materialkennwerte in Zusammenhang mit den angeordneten Klimarandbedingungen gültig. Die Übertragbarkeit auf „ähnliche“ Konstruktionen oder andere Klimabereiche ist nur eingeschränkt möglich und erfordert im Allgemeinen eine Neubewertung.

Simulationen mit Schlagregeneinfluss

Die Auswertung der Matrix von Simulationen mit Schlagregeneinfluss (Tabelle 3.11 unten) gestaltet sich folgendermaßen. Die große Menge eindringenden Regens beruht auf einigen, sehr ungünstigen Randbedingungen (Abschnitt 3.4). Deshalb ziehen das Nichteinhalten der maximalen inneren Kondensatmenge und die unvollständige Verdunstung des inneren Kondensats nur eine gelbe Warnung nach sich. Wurde jedoch schon bei der Simulation ohne Schlagregeneinfluss die innere Kondensatmenge überschritten oder war die Verdunstung des Kondensats nicht gegeben, wurden solche Konstruktionen auch als negativ bewertet. Am konkreten Objekt muss dann der Planer entscheiden, ob in konstruktiven Details Schwachstellen vorliegen, die eingehender untersucht werden müssen oder ob der Schlagregenschutz eine langfristig ausreichende Sicherheit gegen eindringende Feuchte garantiert. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die Verwendung eines anderen Klimas zu abweichenden Beurteilungen führen kann.

Abschlussbewertung

Eine einzige negative Bewertung bei den stationären Berechnungen (z.B. Tabelle 3.6) oder bei den Simulationen ohne Schlagregeneinfluss (siehe Tabelle 3.11 oben) führt zu einem negativen Urteil (rotes Kästchen) in der Abschlussbewertung. Wird bei der Betrachtung des Schimmelpilzwachstums im Gebäudewinkel festgestellt, dass der Isopleth für Auskeimung zwar überschritten wurde, aber die Häufigkeit der Überschreitungen des LIM nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen ist (gelber Kreis in Tabelle 3.11), wird dies trotzdem mit einer grünen Markierung bewertet.

3 Bewertungskriterien



Als Vorzugsvarianten werden auf Grund der niedrigeren Wärmeenergieverluste höhere Dämmdicken bevorzugt, sofern die überprüften Kriterien eingehalten werden.



4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Konstruktionskatalog in Teil II enthält eine detaillierte Dokumentation der Ergebnisse und Bewertungen für verschiedene Wandaufbauten und Innendämmsysteme, welche in diesem abschließenden Kapitel diskutiert werden sollen. Das hydrothermische Verhalten einer Auswahl von innen gedämmten Wandaufbauten wurde mit den in Kapitel 2 vorgestellten Verfahren nach DIN 4108, COND und DELPHIN berechnet und die Rechenergebnisse wurden unter Anwendung der Kriterien in Kapitel 3 bewertet.

Der Konstruktionskatalog ist auch als Handreichung für die Praxis gedacht. Die Dämmstoffdicken sind moderat gewählt worden, um die Balance zwischen Wärme- und Feuchteschutz zu halten. Um die zukünftigen Anforderungen der EnEV zu erfüllen, wird man allerdings größere Dämmstoffdicken bemessen müssen, wenn keine Ausnahmegenehmigung vorliegt. Die kritischen Werte der Kondensatmenge und die biomechanischen Belastungskennwerte steigen aber mit zunehmender Dämmstoffdicke, so dass für Dämmstoffdicken, die nicht im Katalog enthalten sind, entsprechende Nachweise mit der Simulation zu empfehlen sind.

Konstruktionen mit diffusionsoffener kapillaraktiver Innendämmung

Beidseitig diffusionsoffene Konstruktionen wiesen auch bei Simulationen mit Niederschlag nur geringe Mengen an innerem Kondensat auf, wenngleich auf Grund verschiedener Ursachen. Bei Calciumsilikatplatten (z.B. Wandaufbau 1.2) sorgt die hohe Flüssigwasserleitfähigkeit für eine kapillare Entspannung, der niedrige Diffusionswiderstand gewährleistet zusätzlich ein hohes Austrocknungspotential nach innen. Wenn zusätzlich noch ein historischer Kalkputz mit vergleichsweise hohem A_w -Wert und niedrigem Diffusionswiderstand auf der Außenseite angebracht war (Wandaufbau 1.4), konnte der insgesamt niedrigste Kondensatverlauf erzielt werden. Auch mit Wärmedämmlehm (z.B. Wandaufbau 10.2), Wärmedämmlehmplatten (z.B. Wandaufbau 10.5) oder einer Kombination aus wasserabweisendem, diffusionsdichtem Außenputz und kapillaraktivem Innendämmmaterial (Wandaufbau 1.5) wurden vergleichsweise geringe Kondensatmengen erreicht. Wird eine diffusionsoffene Innendämmung mit hoher Flüssigwasserleitfähigkeit dagegen bei einer Konstruktion mit völlig unzureichendem Schlagregenschutz eingesetzt (Wandaufbau 1.7, Calciumsilikat mit unverputztem Altbauziegel) kann dies trotz des kapillaraktiven Dämmmaterials zu hohen Feuchtebelastungen führen. Die Ergreifung weiterer Maßnahmen, z.B. einer Hydrophobierung (Wandaufbau 8.6) erscheint dann für diesen Fall ratsam.

Dass eine sachgerechte Verarbeitung gemäß den Herstellerangaben entscheidend für die Funktionsfähigkeit einer Innendämmung sein kann, wird mit der Besprechung in Wandaufbau 1.8 aufgezeigt. Statt einer flächigen Verklebung wurde hier nur eine punktuelle Verklebung vorgenommen, weshalb die kapillare Leitfähigkeit nicht wirksam werden kann. Der durch die Innendämmung diffundierende Wasserdampf kondensiert dann an der kalten Seite der Luftschicht aus, in diesem Beispiel auf dem bestehenden Kalkputz, und kann somit nur an den par-



tiell verklebten Stellen von der Dämmung aufgenommen werden. In der Folge nimmt die Tauwassermenge stark zu.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisdaten der Wandaufbauten 1.1 bis 1.3 mit 1.6 zeigt, dass durch den in 1.6 außen zusätzlich angebrachten Wärmedämmputz die Einspareffekte bezüglich der Heizenergie nur gering sind: Der U -Wert wird maximal um $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert. Dennoch erhöht die zusätzliche Putzschicht die Sicherheit vor Feuchteschäden, da das Feuchtelevel im Wandquerschnitt deutlich sinkt. Dies veranschaulichen die Kondensatmengen und Feuchteprofile. Der Effekt der zusätzlichen Wärmedämmschicht auf die Aufnahme von Niederschlag ist vergleichbar mit der Verwendung eines wasserabweisenden statt eines nur wasserhemmenden Putzes. Jedoch beeinträchtigt die diffusionsoffene Ausbildung des Dämmputzes im Gegensatz zu diffusionsdichten Schichten die Austrocknung kaum.

**Konstruktionen
mit externem
Wärmedämmputz**

Die Wandaufbauten 2.1 und 2.2 bestehen aus einer Innendämmung mit Cellulose zwischen einer mit Gipskarton kaschierten Holzständerkonstruktion. In Wandaufbau 2.1 ist zwischen Dämmschicht und Gipskarton eine Dampfbremse mit konstantem s_d -Wert verarbeitet, Wandaufbau 2.2 ist mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse versehen. Erst die Verwendung des Simulationsverfahrens kann deutlich machen, dass bei hoher eindringender Schlagregenmenge bei dieser Konstruktion selbst die Anwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse die Feuchtebelastung nicht ausreichend reduzieren kann, was sich z.B. mit Schlagregeneinfluss an der Kondensatmenge und an der Zeitdauer möglichen Schädlingwachstums abzeichnet. Die an der Dampfbremse anliegenden Luftfeuchten sind nicht ausreichend, um die positiven Diffusionseigenschaften der Dampfbremse zu aktivieren.

**Konstruktionen
mit Dampfbremse**

In allen Wandaufbauten mit diffusionshemmenden Dämmmaterialien, die keine oder nur eine sehr geringe Flüssigwasserleitfähigkeit aufwiesen, wurde bei Westausrichtung und Schlagregeneinwirkung eine sehr hohe Feuchtebelastung errechnet, beispielsweise mit PUR-Platten (Wandaufbauten 8.1 bis 8.3), Porenbetonsteinen mit Luftschicht zwischen Wand und Dämmung (Wandaufbau 7.1), Holzweichfaserdämmplatten (Wandaufbauten 3.1 bis 3.3) und Schaumglas (Wandaufbauten 9.1 bis 9.3).

**Konstruktionen
mit innenseitiger
diffusionshem-
mender Schicht**

Wird durch die Anwendung eines wasserabweisenden, diffusionsdichten Kunstharzputzes das Eindringen von Schlagregen weitgehend verhindert, sind in „den ersten Jahren“ der Simulation tatsächlich deutlich niedrigere, innere Kondensatmengen zu verzeichnen. Trotzdem kann es bei einer entsprechenden Materialkombination wie in Wandaufbau 8.5, Innendämmung mit PUR-Platten und außen Kunstharzputz, vorkommen, dass der Wassergehalt im Lauf der Jahre langsam aber kontinuierlich ansteigt. Hauptgrund für dieses Verhalten ist der zu hohe Dampfdiffusionswiderstand der Außenputzschicht, der das Austrocknungspotential nach außen zu stark einschränkt. Auf diese Weise kann Innenraumfeuchte, die in den Wandaufbau diffundiert oder die trotz der niedrigen Leitfähigkeit ein-



4 Zusammenfassung und Ausblick

dringende geringe Schlagregenmenge, nicht ausreichend durch die diffusionsdichte Putzschicht verdunsten. Die diffusionshemmende PUR-Platte auf der Innenseite reduziert nicht nur die vom Raum eindiffundierende Wasserdampfmenge, sondern auch das wichtige Austrocknungspotenzial nach innen.

Ebenso wurden diffusionsoffene Innendämmmaterialien mit geringer Kapillarwirkung eingesetzt, z. B. Wandaufbau 3.1 und 4.3 mit HWL- bzw. Holzweichfaserdämmplatten. Von einigen Herstellern wird dabei die Verwendung einer stark dampfdiffusionshemmenden Schicht auf der Raumseite vorgeschrieben. In Wandaufbau 3.4, Innendämmung mit Holzweichfaserdämmplatten, wird dies durch einen Putz realisiert, der den Dampftransport in die Konstruktion und somit auch zur Kondensationsebene stark begrenzt. Dass diese Maßnahme notwendig ist, bestätigt der Vergleich der Konstruktionen in Wandaufbau 3.4 mit 3.1 bis 3.3. Die Tauwassermenge kann (ohne Schlagregeneinfluss) praktisch auf Null reduziert werden. Dennoch bleibt auch mit dem Wandaufbau 3.4 die innere Kondensatmenge auf einem sehr hohen Niveau, wenn der Regen auf die Konstruktion aufgeprägt wird. Auch hier führt die stark eingeschränkte Austrocknungsfähigkeit nach innen zum Versagen des Systems.

Konstruktion mit Wärmedämmverbundsystem

Wenn keine denkmalschutzrechtlichen oder andere speziellen Gründe gegen eine Außendämmung sprechen, wird diese üblicherweise einer Innendämmung vorgezogen. Zu Vergleichszwecken wurden deshalb auch Konstruktionen mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) untersucht. Die Konstruktionen in Wandaufbau 8.5 (Innendämmung mit PUR-Platten) und 12.1 (Außendämmung mit PUR-Platten) weisen praktisch dieselben Materialien auf, in Wandaufbau 12.1 ist jedoch die PUR-Platte als Außendämmung mit entsprechenden Putzen angeordnet. Die eindringende Schlagregenmenge ist bei Innendämmung (Wandaufbau 8.5) weitaus größer, da bei intakter Außendämmung durch den dichten Außenputz und die äußere Dämmschicht kein Regenwasser in die Konstruktion gelangen kann.

Die äußeren Putzschichten des WDVS-Systems unterliegen höheren biomechanischen Belastungen. Das Profil der Frost-Tau Wechsel konzentriert sich auffallend nahe der Außenoberfläche und weist mit über 90 die insgesamt höchste Anzahl von Frost-Tau Wechseln auf. Mit Ausnahme der thermischen Rissinduktionsbelastung steigen auch die Belastungskennzahlen im Vergleich zur unsanierten Variante zum Teil drastisch an: Die hygrische Witterungslast (Feuchteschwankungen) auf der Bauteiloberfläche verstärkt sich bei den Varianten mit Schlagregen sogar um mehr als das Doppelte. Aus diesem Grund müssen diffusionsdichte Außenputze von WDVS-Systemen - im Zusammenspiel mit den eingelegten Armierungsgeweben - über eine hohe Witterungsbeständigkeit verfügen. Auch für den Schädlingsbefall sind die insgesamt längsten Perioden mit günstigen Wachstumsbedingungen festzustellen, vorwiegend bedingt durch die fehlende Wärmespeicherkapazität der oberflächennahen Schichten. Auf den



Zusammenhang zwischen dem Wärmespeicherverhalten von WDVS-Systemen und Algenwachstum wurde in mehreren Publikationen hingewiesen.

In den Wandaufbauten 6.1, Altbauziegel mit Mineralfüllplatten, und 6.6, Kalksandstein mit Mineralfüllplatten, weisen die Konstruktionsvarianten eine ungefähr gleiche Dicke und einen ähnlichen Wärmedurchlasswiderstand auf. Es zeigte sich, dass mit Kalksandstein das maximale innere Kondensat ungefähr um den Faktor 6 höher verläuft, obwohl beide Aufbauten praktisch dieselbe Niederschlagsmenge aufnehmen. Der ungefähr dreimal höhere Diffusionswiderstand und die viel niedrigere Kapillarität des Kalksandsteins verzögern jedoch das Abtrocknen erheblich, wodurch sich im Verlauf der Jahre ein weitaus höheres Feuchtelevel ausbildet.

Dass sich bei den Simulationen ohne eindringenden Schlagregen mit Kalksandstein (Wandaufbau 6.6) eine geringere Menge Kondensat als mit Altbauziegelmauerwerk bildet, liegt weniger am Wandbildner, sondern vielmehr an dem vorhandenen historischen (Innen-)Kalkputz bei Wandaufbau 6.1: Der bestehende Altputz, der Kleber und die Dämmung speichern fast das gesamte Kondensat, im Altbauziegel ist praktisch kein Kondensat vorzufinden.

Beim Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Altbauziegeln (Wandaufbauten 1.1 bis 1.3) und Norm-Vollziegeln (Wandaufbauten 1.9 bis 1.11) konnte beobachtet werden, dass die Wärmeverluste mit dem historischen Mauerwerk wegen des niedrigeren Wärmedurchlasswiderstands des Altbauziegels bei gleicher Wanddicke signifikant höher sind. Gleichwohl waren analog zum vorherigen Vergleich von Altbauziegeln mit Kalksandstein feuchtetechnische Vorteile des historischen Gemäuers zu erkennen: Wiederum lassen sich wegen der höheren Flüssigwasserleitfähigkeit und dem niedrigeren Dampfdiffusionswiderstand bei Schlagregeneinwirkung niedrigere Kondensatmengen mit dem Altbauziegel registrieren.

Die Unterschiede zwischen den R - und U -Werten aus den DIN- und COND-Berechnungen und aus den Simulationen mit DELPHIN sind - in Abhängigkeit vom Wandbildner - relativ klein. Hauptsächlich die nächtliche Abstrahlung und die genauere Berücksichtigung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit verursachen den erhöhten Wärmestrom. Der schlagregenbedingte Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, und damit auch auf die thermischen Konstruktionskennwerte, ist bei dem hauptsächlich verwendeten Altbauziegel und dem Norm-Vollziegel klein. Erst bei sehr hoher Luftfeuchte über 98 % nehmen die Ziegel nennenswerte Feuchtemengen auf. Die Feuchte wird jedoch schnell weitergegeben bzw. verdunstet wieder, sodass die Wärmeleitfähigkeit nur für kurze Zeitabschnitte durch das gespeicherte Flüssigwasser erhöht wird. Lediglich bei Wandaufbauten, die sehr viel Schlagregen aufnehmen, kommt es zu nennenswerten Differenzen, z.B. in Wandaufbau 8.1 (Innendämmung mit PUR-Platten): Mit 30 mm Innendämmung sinkt der instationäre Wärmedurchlasswiderstand der

**Vergleich der
Wandbildner**

**Feuchteabhängige
Wärmeleitfähigkeit**



4 Zusammenfassung und Ausblick

schlagregenexponierten Wand um 0,09 auf 1,37 m²K/W bzw. steigt $U_{inst,HP}$ von 0,61 auf immerhin 0,65 W/m²K.

Besteht der Wandbildner aus Kalksandsteinen anstatt Ziegelmauerwerk konnte dagegen eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt festgestellt werden (Wandaufbauten 6.5 und 6.6). Der verwendete Kalksandstein weist mit 6,0 Vol% als Ausgleichsfeuchte zu 90 % relativer Luftfeuchte den 10-fachen Wassergehalt im Vergleich zu dem Altbauziegel (0,6 Vol%) auf, entsprechend höher ist die Wärmeleitfähigkeit. Der U -Wert erhöht sich beispielsweise in Wandaufbau 6.5 mit 50 mm Dämmung (Westseite mit Schlagregen) durch die sehr hohe eindringende Schlagregenmenge von 0,67 auf 0,76 W/m²K. Der stationäre U -Wert beträgt dagegen ohne Berücksichtigung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit 0,64 W/m²K. Bei der genannten Konstruktion führte der hohe Feuchteeinfluss weiter zu der Bewertung, dass der Mindestwärmeschutz von $R_{min} \geq 1,2$ m²K/W mit Schlagregeneinfluss nicht eingehalten werden konnte (1,15 m²K/W), ohne Schlagregeneinwirkung jedoch mit 1,32 m²K/W erfüllt wird.

Es konnten auch einige weitere Konstruktionen identifiziert werden, bei denen der Mindestwärmeschutz R_{min} mit den stationären Berechnungen eingehalten wurde, wohingegen $R_{inst,HP}$ bei der Verwendung der Simulationssoftware und realer Klimawerte den Grenzwert, wenn auch knapp, überschritt (z.B. Wandaufbauten 7.1, 10.6, 1.9 und 1.10).

Innere Kondensatmenge

Da der wesentliche Unterschied zwischen den Berechnungsmethoden nach DIN und COND in der Berücksichtigung der Flüssigwasserleitfähigkeit liegt, kommt es vielfach zu abweichenden Bewertungen, wenn Tauwasser an kapillar leitfähigen Schichten ausfällt. Viele Konstruktionen mit diffusionsoffener, kapillaraktiver Innendämmung, z.B. in den Wandaufbauten 1.1 bis 1.4, waren erst durch die Anwendung des COND-Verfahrens bzw. durch die Simulation nachweisbar gemäß den Anforderungen der *DIN 4108-3*. Die Gruppe der diffusionsoffenen Innendämmsysteme stellt offenkundig den wichtigsten Einsatzbereich für das COND-Verfahren dar.

Die COND-Ergebnisse erfuhren durch die Simulationsergebnisse eine Bestätigung. Es zeigte sich, dass die durch COND (konstantes Klima) und DELPHIN (Realklima) berechneten Kondensatmengen vergleichsweise nah beieinander lagen. Sofern in der Simulation kein eindringender Schlagregen mit einberechnet wurde, waren durch die Verwendung realer Klimadaten und genauerer Material- und Prozessmodellierung noch niedrigere Kondensatmengen zu verzeichnen.

Gleichwohl konnten einige Wandaufbauten nur mit Hilfe der Simulation nachgewiesen werden. Erst die Verwendung des realitätsnäheren Verlaufs der Flüssigwasserleitfähigkeit in den Simulationen führte dazu, dass bestimmte Konstruktionsvarianten die Kondensatmenge von 1,0 kg/m² nicht überschritten (ohne Schlagregeneinfluss). Hierzu zählen viele Wandaufbauten mit Mineral-



dämmplatten, z.B. 6.1 bis 6.3 sowie 6.5 und 6.6. Die berechnete Tauwassermenge unterschritt dann allerdings den Grenzwert von $1,0 \text{ kg/m}^2$ zumeist deutlich.

Die Anforderung des Mindestwärmeschutzes für den eindimensionalen Wandbereich zielt auch darauf ab, Schimmelbefall im Gebäudewinkel zu vermeiden. Folgerichtig korrespondiert R_{min} mit dem f_{Rsi} -Wert sowie mit der Untersuchung eines möglichen Schimmelpilzwachstums im Gebäudewinkel, welche durch Simulationsverfahren bereit gestellt werden kann.

In der Mehrzahl der hier vorgestellten Berechnungsergebnisse liefern alle Beurteilungsverfahren identische Bewertungen ab. Bei einigen der untersuchten Konstruktionen, siehe die Berechnungen für Wandaufbauten 1.3, 6.1 und 6.4, liegen jedoch uneinheitliche Einschätzungen vor. In allen drei Beispielen wird der betreffende Wandaufbau anhand des Mindestwärmeschutzes negativ beurteilt, während der f_{Rsi} -Wert immer über dem Grenzwert von 0,7 liegt. Dazwischen liegen die Einschätzungen, die mit Hilfe des Schimmelpilzwachstums vorgenommen wurden: Zweimal in Übereinstimmung mit dem Mindestwärmeschutz und einmal mit dem f_{Rsi} -Wert (Wandaufbau 1.3). Für die Bewertung der Schimmelf Gefahr im Gebäudewinkel ist somit der Grenzwert von $1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ für den Mindestwärmeschutz dem f_{Rsi} -Wert tendenziell vorzuziehen. Schließlich lässt sich mit Hilfe der Isoplethen die tatsächliche Wahrscheinlichkeit des Schadeneintritts präziser prognostizieren, liegt aber laut *WTA 6-3-05* trotzdem auf der sicheren Seite.

Wenn das am Gebäudestandort vorherrschende Klima weniger kritische Durchschnitts- oder Extremtemperaturen im Winter aufweist, hat dies nicht zwangsweise zur Folge, dass die Sicherheit vor Schimmelpilzwachstum größer wird. Dies zeigt der Vergleich von Wandaufbauten 6.1 bis 6.3 (TRY-Klima Passau) mit Wandaufbau 6.4 (TRY-Klima Potsdam), Altbauziegel innen gedämmt mit Minerale dämmplatten. Bei der Generierung des Innenklimas aus den Außentemperaturen (siehe Abbildung 3.1) wurde auch der Einfluss der Lüftung berücksichtigt. Das bedeutet, dass bei niedrigeren Außentemperaturen Außenluft mit einem geringeren, absoluten Feuchtegehalt in den Raum strömt und somit auch die relative Luftfeuchte entsprechend geringer ist. Die Innenraumlufffeuchte verlief deshalb mit Potsdamer Klima etwas höher. Erst länger anhaltende Kälteperioden insbesondere mit Temperaturen unter -10°C , welche die Konstruktionen stärker auskühlen, erhöhten die Gefahr von Schimmelpilzwachstum merklich.

Weil in den meisten Konstruktionen mit feuchtesensitiven Materialien wie Holz selbige im Bereich des inneren Kondensats lagen, verlief die Belastung hinsichtlich eines Schädlingsbefalls qualitativ in Übereinstimmung mit der auftretenden Tauwassermenge. In allen Simulationen konnte übereinstimmend registriert werden, dass mit der Dämmstoffdicke das Risiko von Algenbewuchs steigt. Zusätzlich forciert ein durch die Innendämmung bedingter hoher Feuchtegehalt im Wandquerschnitt erwartungsgemäß die Gefahr von Frostschäden.

Vermeidung von Schimmelbefall

Schädlingswachstum, Algenbefall



4 Zusammenfassung und Ausblick

Schlagregen- einfluss

Bei der Beschreibung der Klimaelemente für die Simulation wurde einerseits auf die ausgeprägte Abhängigkeit der auf die Außenwand auftreffenden Menge Schlagregen von örtlichen Standortfaktoren (Lage, Geometrie, Witterungsschutz durch andere Gebäude oder Vegetation, etc.) eingegangen und andererseits auf die speziellen Oberflächenfaktoren. Die getroffenen ‚worst case‘-Annahmen hinsichtlich Standort und Oberflächeneinflüsse sowie die Wahl eines *nur* wasserhemmenden Außenputzes in den meisten Fällen (siehe Abschnitt 3.4) zog in Simulationen mit schlagregenexponierten Konstruktionen eine sehr hohe Feuchteaufnahme nach sich. Insbesondere bei Wandaufbauten mit diffusionsdichter Innendämmung - und somit fehlender Austrocknungsmöglichkeit zum Innenraum - stieg die Feuchtebelastung durch das Eindringen der Feuchte von der Außenseite beträchtlich an. Zwar blieb das Mikroklima auf der Wandinnenoberfläche nahezu unbeeinträchtigt, in der Konstruktion war allerdings ein weitaus höheres Feuchteniveau festzustellen, welches besonders beim Vorliegen feuchtesensibler Materialien das Risiko von Schäden erhöht.

Folglich sind detaillierte Simulationsrechnungen bei exponierten Wandkonstruktionen, für die auch durch Sanierungsmaßnahmen keine ausreichende Schlagregensicherheit gewährleistet werden, ein hilfreiches Mittel, um das Schadensrisiko abzuschätzen. Die Untersuchung und Anwendung möglicher Gegenmaßnahmen, z.B. einer Hydrophobierung (Wandaufbau 8.6) kann die Gefahr von Feuchteschäden minimieren. Insbesondere, wenn aus denkmalrechtlichen Gründen eine Hydrophobierung die einzige, auf der Außenoberfläche akzeptierte Behandlung ist. Doch auch bei ausreichendem Schlagregenschutz kann sich bei bestimmten Konstruktionen durch langjährige Akkumulation (z. B. Wandaufbau 8.5) ein potentiell kritisches Feuchteniveau ausbilden.

Auf dieselbe Weise lassen sich neben Schlagregen weitere hygrothermische Belastungen wie aufsteigende Feuchte, Einbaufeuchte, hohe Belastungen durch das Innenklima oder Havarien erst durch Simulationsverfahren berücksichtigen. Stationäre Verfahren können derlei Feuchtelasten nur stark eingeschränkt oder gar nicht untersuchen.



4.2 Ausblick

Im Feuchteatlas wurde ein Katalog von innen gedämmten Wandaufbauten auf hygrothermische Eignung und Zulässigkeit untersucht. Dabei kamen drei verschiedene Bewertungsmethoden zum Einsatz:

1. Durch die Anwendung der in DIN 4108 etablierten Rechenmethoden und Kriterien konnten Möglichkeiten und Grenzen der Normverfahren aufgezeigt werden.
2. Das praxisgerecht aufbereitete COND-Verfahren baut im Wesentlichen auf den DIN-Methoden auf, erweitert aber den Feuchteschutznachweis auf mehreren Gebieten.
3. Die numerische Simulation mit DELPHIN beschreibt die hygrothermischen Prozesse unter realen Klimabedingungen und in größerer Detaillierungstiefe. Dadurch können Unsicherheitsfaktoren ausgeräumt und bisher weniger beachtete Problemfelder angegangen werden.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren konnte festgestellt werden, dass sich vor allem für den hygrothermischen Nachweis diffusionsoffener, kapillaraktiver Innendämmsysteme das herkömmliche DIN-Verfahren als unbrauchbar erweist. Mit dem ebenfalls stationären, eindimensionalen COND-Algorithmus dagegen, welcher auch die Flüssigwasserleitfähigkeit mit einberechnet, konnte die Tauglichkeit vieler Wandaufbauten nachgewiesen werden.

Der Feuchteatlas stellt heraus, wie mittels hygrothermischer Software eine weit- aus genauere Prüfung unterschiedlicher Konstruktionsvarianten ermöglicht wird. Besondere klimatische Einflüsse, wie Schlagregen oder Frost-Tau Wechsel und deren Auswirkungen auf die Gebäudehülle, Wärme- und Feuchtespeicherung bzw. die langjährige Akkumulation von Kondensat, die Untersuchung inhomogener Wandaufbauten (Innendämmung mit Konstruktionshölzern, Fachwerk) oder zweidimensionaler Konstruktionen bzw. die Berücksichtigung besonderer Materialeigenschaften können mit Hilfe der Simulationssoftware erfasst werden.

Es wäre zu begrüßen, wenn einige zusätzliche Aspekte des komplexen hygrothermischen Verhaltens in vereinfachter Form Niederschlag in den Normen und Richtlinien fänden. Durch die Berücksichtigung der Kapillarität könnte beispielsweise Potenzial für die Senkung der Transmissionswärmeverluste freigelegt werden.

Die zukünftigen Anforderungen an die Gebäudehülle werden von der Notwendigkeit zur Reduzierung der CO²-Emissionen geprägt. Das bedeutet höher gedämmte und luftdichtere Konstruktionen, auch im Bestand. Diese Forderung kann mit klimatoleranten, diffusionsoffenen und dauerhaften Konstruktionsprinzipien kollidieren, die für die Altbausanierung maßgebend sein sollten. Auch im Neubau muss der Aspekt der Dauerhaftigkeit im Vordergrund stehen, auch wenn



4 Zusammenfassung und Ausblick

eine ganzheitliche Analyse, die auch die energetischen Aufwendungen zur Produktion der Materialien und Herstellung der Gebäude sowie das Recycling mit bewertet, noch nicht implementiert ist.

Auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeitsanalyse von Baukonstruktionen unter klimatischen Einflüssen besteht Forschungsbedarf. Die hier im Feuchteatlas angeschnittene Problematik der biomechanischen Belastungskennzahlen muss angesichts der steigenden Anforderungen an die Gebäudehülle weiter untersucht werden. Ansätze dazu bestehen in der Kopplung von hygrothermischer Simulation und FEM-Strukturmechanik (eine DELPHIN-ANSYS-Kopplung wurde bereits realisiert).

Neue Berechnungsmöglichkeiten ziehen neue Bewertungskriterien nach sich. Die Begrenzung des inneren Kondensats nach DIN 4108 bewertet weder die räumliche Verteilung des Kondensats noch die materialspezifische Feuchteempfindlichkeit. Zu begrüßen wären Kenndaten, welche die maximal zulässige bauklimatische Exposition von Materialien beschreiben. Sicherlich existieren solche Kenndaten. Es fehlt an deren gezielter Sammlung und Bereitstellung für bauphysikalische Nachweise.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Handhabbarkeit und die Anwenderfreundlichkeit der Verfahren. Der unter Zeit- und Termindruck stehende Architekt oder Ingenieur braucht Verfahren, die er mit vertretbarem Zeitaufwand einsetzen kann. Die Ergebnisse des Feuchteatlas sind unter viel höherem Zeitaufwand zustande gekommen. Für die Umsetzung dieser und weiterer Ergebnisse in die Praxis braucht es geeignete Auswerteverfahren. Notwendig ist ein intelligentes Postprozessing-Werkzeug für die bauphysikalische Analyse von Wandaufbauten. Damit minimiert sich nicht nur der erforderliche Zeitaufwand, auch mögliche Fehlerquellen, insbesondere bei inhomogenen Wandquerschnitten, können so reduziert werden und der erwünschte Informationsgehalt wird ansprechend aufbereitet.

Gleichwohl setzt die Verwendung von Simulationsverfahren mit realen Klimarandbedingungen eine gewisse Erfahrung bei dem Benutzer voraus. Das bezieht sich sowohl auf die Wahl der Materialien, deren Eigenschaften häufig nicht vollständig bekannt sind, als auch auf die Einschätzung der zu erwartenden klimatischen Belastungen. Sinnvolle Vereinfachungen müssen fachgerecht getroffen werden. Das bedeutet, dass in Zukunft noch mehr Wert auf Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis gelegt werden muss. Von Forschungseinrichtungen und Herstellern organisierte Workshops und Schulungen für neue innovative Werkzeuge, Materialien und Komponenten sollten intensiviert werden.

II Konstruktionskatalog



0 Übersicht über Wandaufbauten

0.1 Grundkonstruktionsvarianten

In den eindimensionalen Simulationen werden überwiegend einschalige Mauerwerke mit dem Wandbildner Altbauziegel getestet. Die Dämmsysteme werden in drei handelsüblichen Dicken mit jeweils zwei oder drei häufig vorkommenden Dicken für den statisch tragenden Wandbildner kombiniert. Punktuell kommen bei identischen Dämmvarianten andere tragende Baumaterialien zum Einsatz wie z.B. ein Norm-Vollziegel aus den 80-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts oder ein (künstlichen) Kalksandstein berechnet.

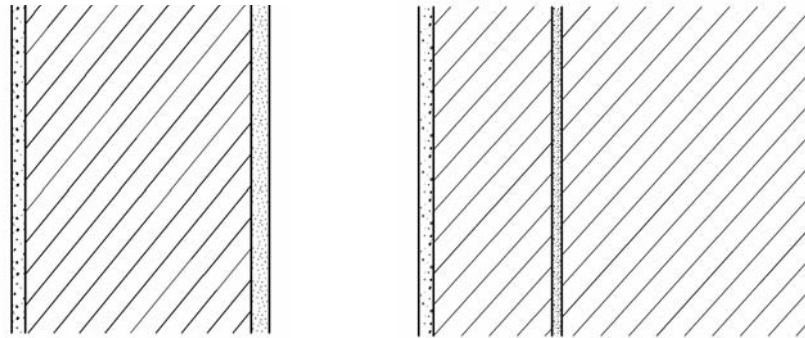


Abb. 0.1: Schematischer Aufbau der bestehenden, ungedämmten Grundkonstruktion: Links mit einer Steinlänge (1 SL) beidseitig verputzt, rechts mit 1½ Steinlängen (1½ SL) außenseitig unverputzt

Bei nur geringen Änderungen von sonst identischen Konstruktionen, z.B. nach dem Austausch des Dämmmaterials oder dem Hinzufügen einer hygriech „dichten“ Schicht Kunstharzputz, wurde nicht immer jede der oben beschriebenen Varianten durchexerziert, sondern nur „typische“ Dicken, d.h. die geringste Mauerdicke mit der dünnsten Dämmdicke, eine Konstruktion mit einer mittleren Mauer- und Dämmschichtdicke sowie die breiteste Wanddicke mit der dicksten Dämmschichtdicke. In solchen Fällen wird immer auf die „Ursprungsvariante“ oder ähnliche Konstruktionen am Ende der Besprechungsblätter verwiesen.

Bewusst werden Konstruktionsvarianten untersucht, die den Mindestwärmewiderstand oder andere Forderungen wie die der *EnEV* nicht erfüllen. Auf diese Weise kann dargestellt werden, wann der Einsatz eines fortgeschritteneren Verfahrens für einen sicheren Nachweis der Gebrauchstauglichkeit notwendig ist und wann eine Konstruktion tatsächlich nicht ausgeführt werden sollte. Zudem kommt es immer wieder vor, dass auf Grund von baupraktischen Einschränkungen Minimalforderungen wie der Mindestwärmewiderstand nicht erfüllt werden können, sodass auch problematische Konstruktionen ausgeführt werden. Immer wieder müssen derartige kritische, in der Vergangenheit ausgeführte Wand- und Dachaufbauten nachträglich bewertet werden.



Im Besprechungsteil werden sanierte Konstruktionsvarianten mit der ungedämmten Wand verglichen. Diese ungedämmte Wand besteht nur aus dem Wandbildner, also Altbauziegel, Kalksandstein, etc., und gegebenenfalls einer vertikalen Mörtelschicht sowie Innen- und eventuell Außenputz. Bei den gedämmten Varianten wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass der alte Innenputz erhalten bleibt und lediglich überputzt wird. Da Außenputz höheren Belastungen ausgesetzt ist und weniger aufwändig zu entfernen ist, wurde hier angenommen, dass dieser im Laufe der Zeit ersetzt wurde. In fast allen Simulationen kommt deshalb derselbe Kalkzementputz als bekleidende Materialschicht zur Anwendung. Um die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Konstruktionsvarianten zu vereinfachen wurde auch grundsätzlich davon ausgegangen, dass innen immer mindestens 5 mm Kalkputz aufgebracht wurden, der gegebenenfalls durch Spritzbewurf oder geeignete Anstriche an der darunter liegenden Schicht haftet.

Auf bestimmte konstruktive Besonderheiten wie z. B. Dübelverbindungen zur Fixierung von Dämmschichten, Mauerwerksanker oder eine exakte Mauerverfugung, mit Mauer- und Verfugungsmörtel, musste verzichtet werden. Zum einen lassen sich dreidimensionale Details derzeit noch nicht mit hygrothermischer Software handhaben, zum anderen wäre der Modellierungsaufwand sehr hoch und die Rechenzeiten würden sich extrem verlängern. Schließlich wird der Einfluss einzelner dreidimensionaler Konstruktionshilfsmittel wie Dübel oder Mauerwerksanker in *DIN 6946* unter bestimmten Voraussetzungen als vernachlässigbar angesehen. Bezüglich der Abbildung einer exakten Verfugung ist festzustellen, dass die durch die Fugen hervorgerufenen Veränderungen maßgeblich von den wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften des verwendeten Fugenmörtels abhängig sind. Die Verfugung kann sich sowohl positiv wie auch negativ auswirken.

Gemäß *DIN 6946* werden dagegen Trägerkonstruktionen von bekleidenden Schichten berücksichtigt, z. B. zur Fixierung von Gipskartonplatten bei einer Innendämmung mit Faserwerkstoffen wie Mineralwolle. In der Regel wurden hierfür Holzleisten mit einem Flächenanteil von 5% statt Aluprofile angenommen. Bei einem 1 m breiten Wandausschnitt würde sich folglich die Breite der Dämmschicht auf 0,95 m, die der Leiste auf 0,05 m belaufen.



0 Übersicht über Wandaufbauten

0.2 Gestaltung des Gebäudewinkels

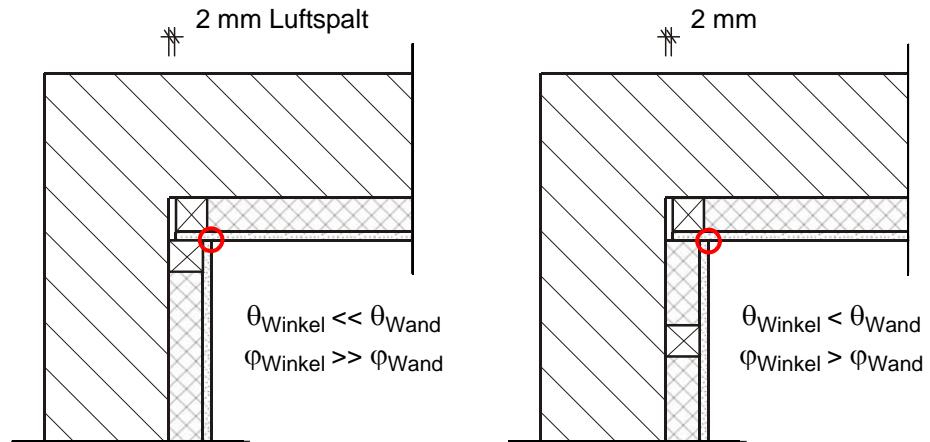


Abb. 0.2: Schnitt durch den Gebäudewinkel bei einem Dämmsystemen mit einer Holzträgerkonstruktion. Mit beiden Holzleisten im Winkel (links) hat die Dämmwirkung des eigentlichen Wärmedämmstoffs nur geringen Einfluss auf die Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel, die Dämmwirkung der Holzleisten dominiert.

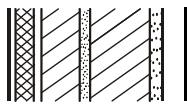
Für Holzständerkonstruktionen wurde in den Simulationen festgelegt, dass im Gebäudewinkel jeweils eine Leiste im Winkel befestigt wird, wobei ein kleiner Luftspalt von 2 mm Dicke zur Westseite verbleibt. In der Praxis kann es vorkommen, dass die erste Holzleiste auf der Westseite im unmittelbaren Anschluss wie in der linken Skizze in Abbildung angebracht wird. Dies hätte sehr niedrige Oberflächentemperaturen im Vergleich zur „ungestörten“ eindimensionalen Wandoberfläche zur Folge: Die Wärmeleitfähigkeit von Konstruktionsholz wie Fichte ist mit $\lambda_R = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ weitaus höher als die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe ($\lambda_R \text{ max. } 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$). Bei Innendämmungen mit Holzständerkonstruktionen würde so die Oberflächentemperatur und Luftfeuchte in erster Linie von der Wärmeleitfähigkeit des Holzes und nicht von der des Dämmstoffes bestimmt, weshalb Eckdetails wie in der rechten Skizze in Abbildung modelliert werden.

Die Dicke der Putz- oder Klebemörtelschichten wurde möglichst einheitlich gewählt bzw. sind sie dem jeweiligen Untergrund, dem verwendeten Dämmsystem oder der während der Bauzeit üblichen Bauweise angepasst. Die Formate der historischen Wandbildner aus Sandstein bzw. Altbauziegel (das so genannte „Reichsformat“) sind *Ahnert & Krause 2000* entnommen. Wenn die Möglichkeit besteht, ein Innendämmsystem mit Dübeln oder Kleber zu fixieren, wurde auf die Kleberschicht verzichtet, sofern sich dadurch die Ergebnisse auf der „sicheren Seite“ bewegen.

Die Konstruktionen im Besprechungsteil sind entsprechend der verwendeten Dämmung alphabetisch angeordnet.

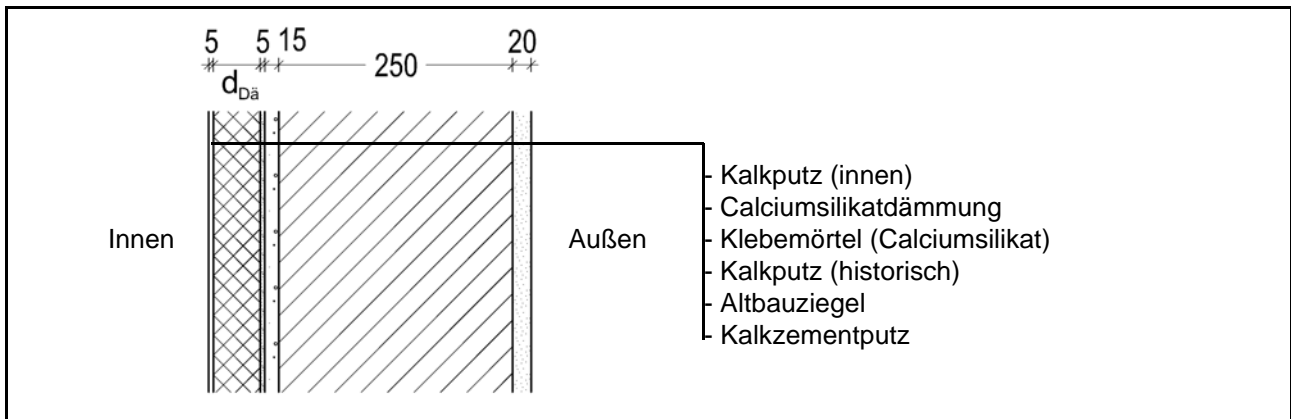
0 Übersicht über Wandaufbauten





1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

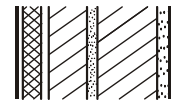
	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	0,83	1,14	1,60
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	1,00	0,77	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,397	2,160	1,741
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,749	2,649	1,876
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,667	0,726	0,778

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5$ °C

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	0,81	1,09	1,53
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	1,02	0,79	0,59
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,162	0,332	0,563
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,749	2,649	1,876
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	64,2	60,6	57,7
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5

1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



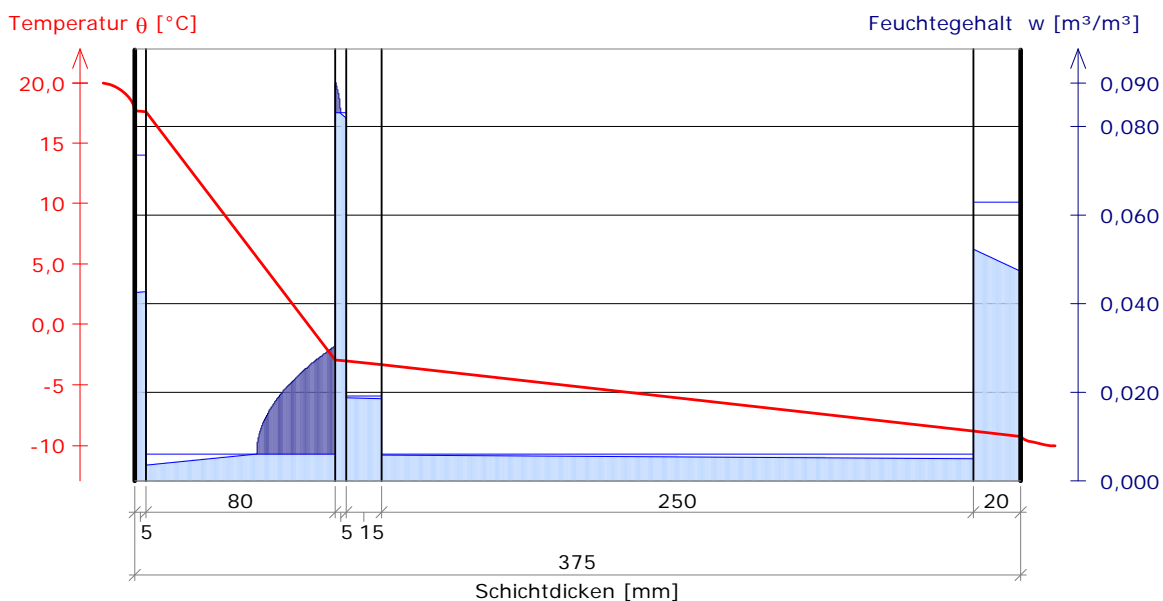
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

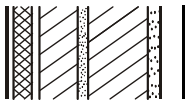
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,7	2026	1169	0,042		
	2 Calciumsilikatplatte	17,6	2011	1163	0,043	
				0,003		
3 Klebemörtel (Calciumsilikat)	-2,9	479	479	0,031	33,7	0,55
4 Kalkputz (historisch)	-3,0	476	469	0,090	2,1	0,01
				0,082		
5 Altbauziegel	-3,3	463	450	0,019		
6 Kalkzementputz	-8,9	288	239	0,018		
				0,006		
Luftschicht (Außenseite)	-9,3	277	208	0,005		
	-10	260	208	0,005		





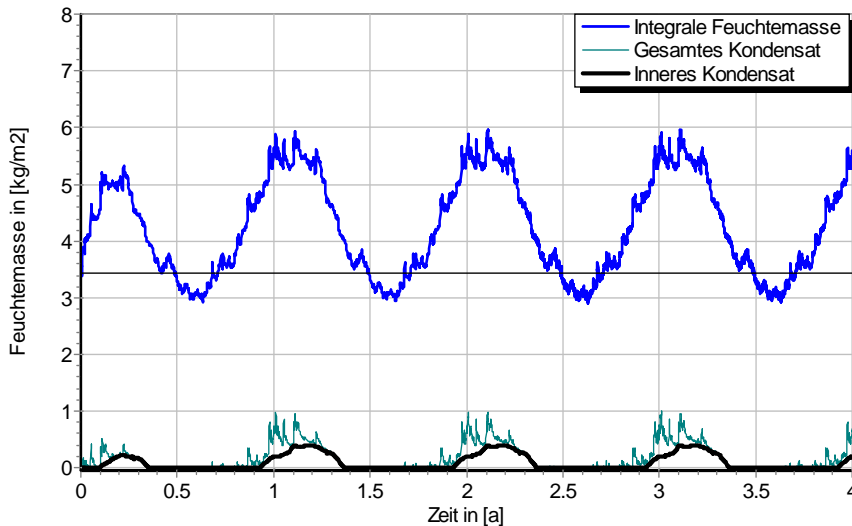
1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 13
 Referenzstandort: Passau



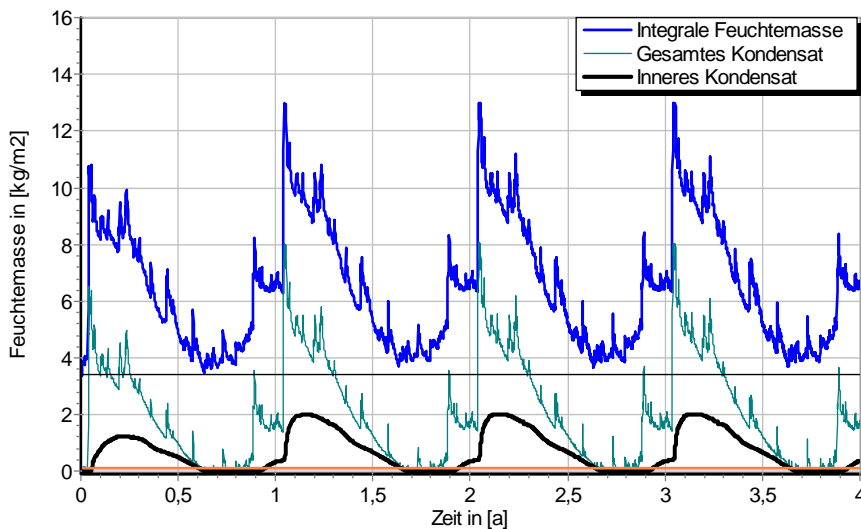
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	1,800	2,200	2,527
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,166	0,270	0,398



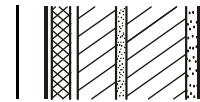
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante in orange

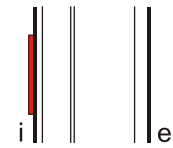
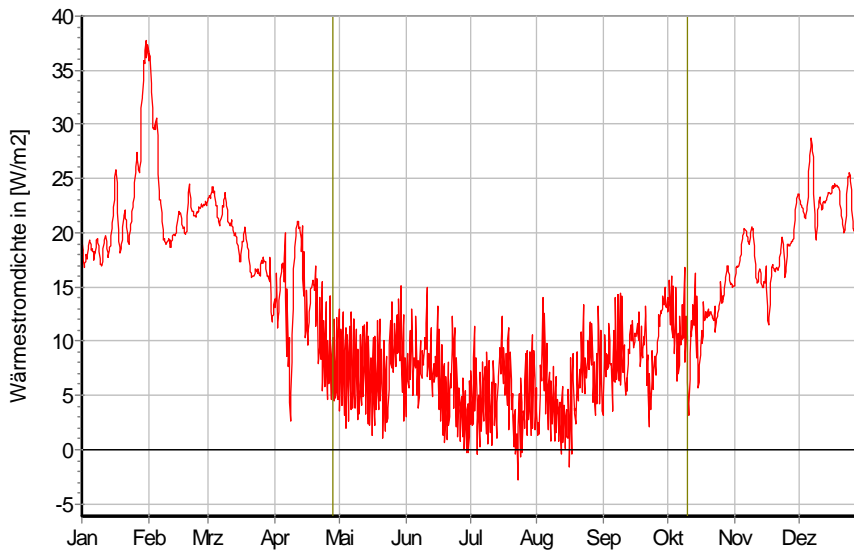
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	8,426	9,021	9,574
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	1,090*	1,628*	2,012*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

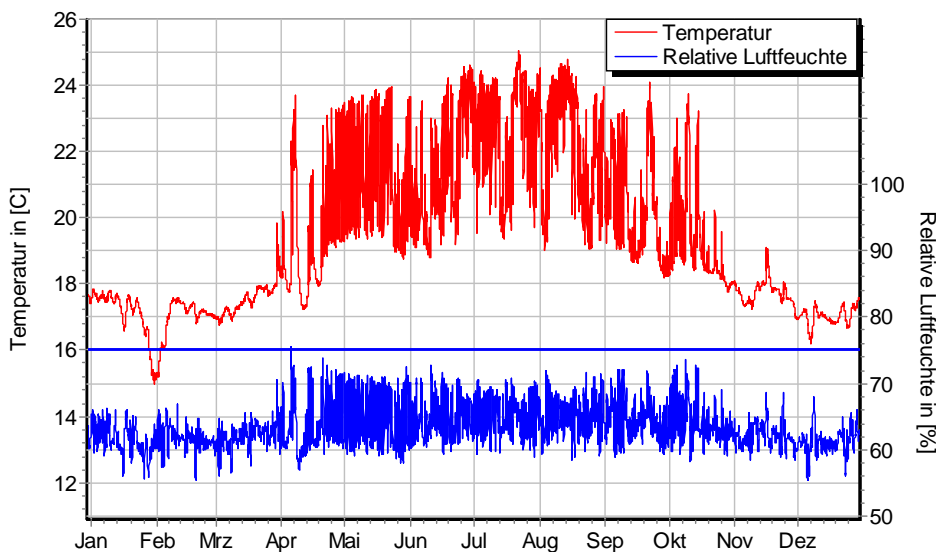


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

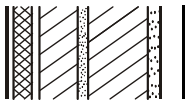
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	18,73	14,41	10,68
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	1,06	0,82	0,61
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,77	1,05	1,48

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	18,49	14,25	10,62
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	1,05	0,81	0,60
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,78	1,06	1,49

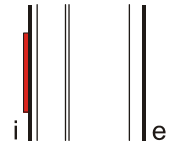
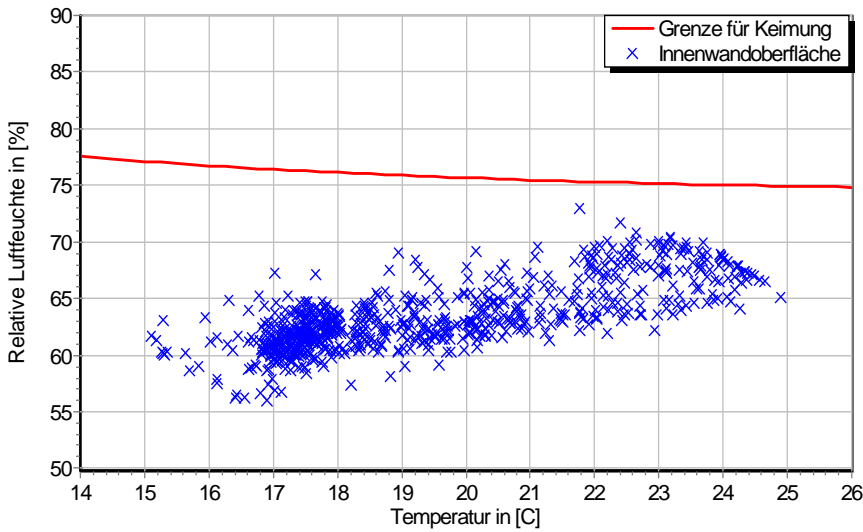
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



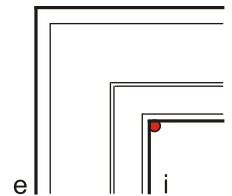
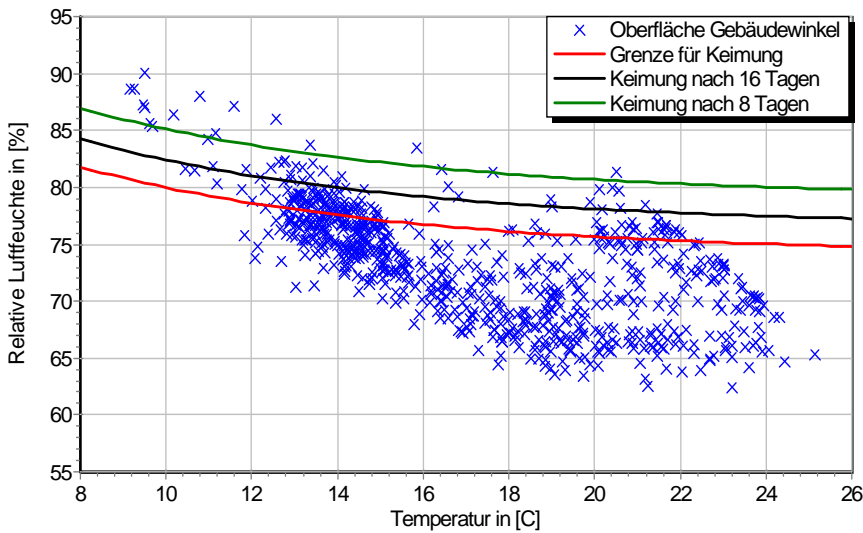
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

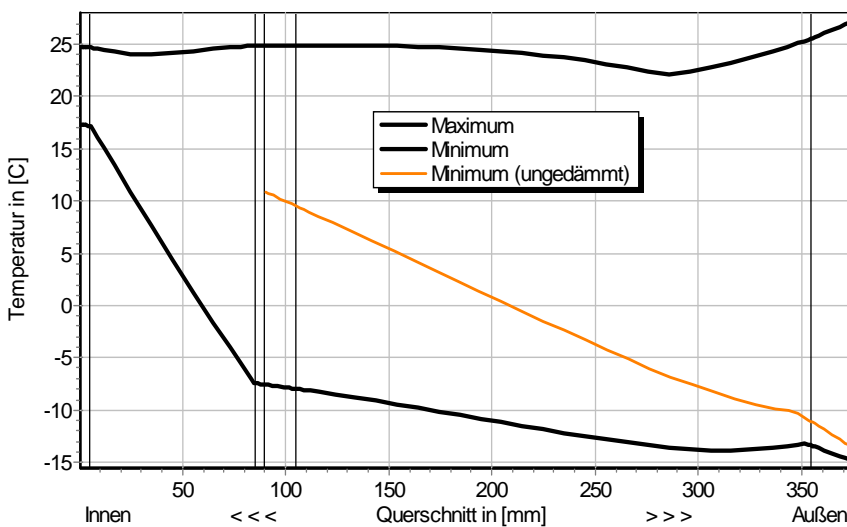


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



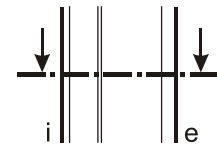
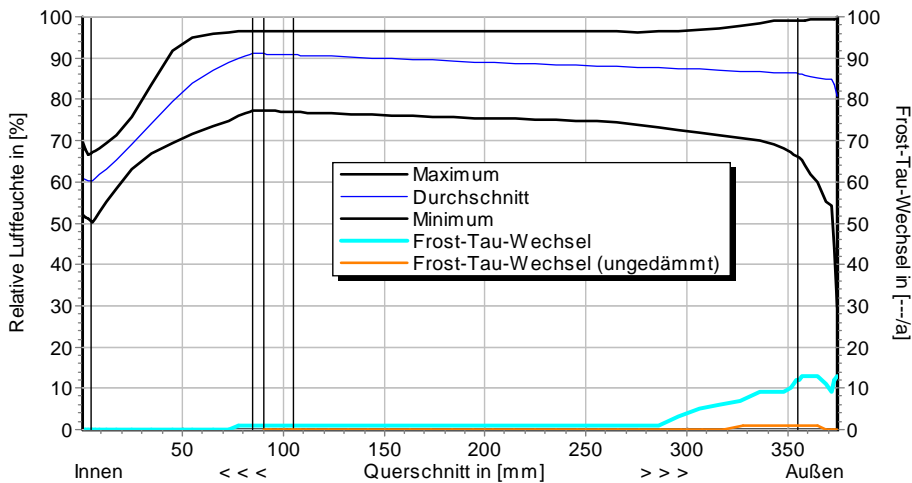
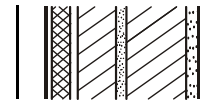
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

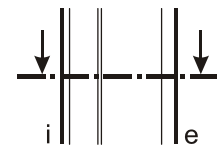
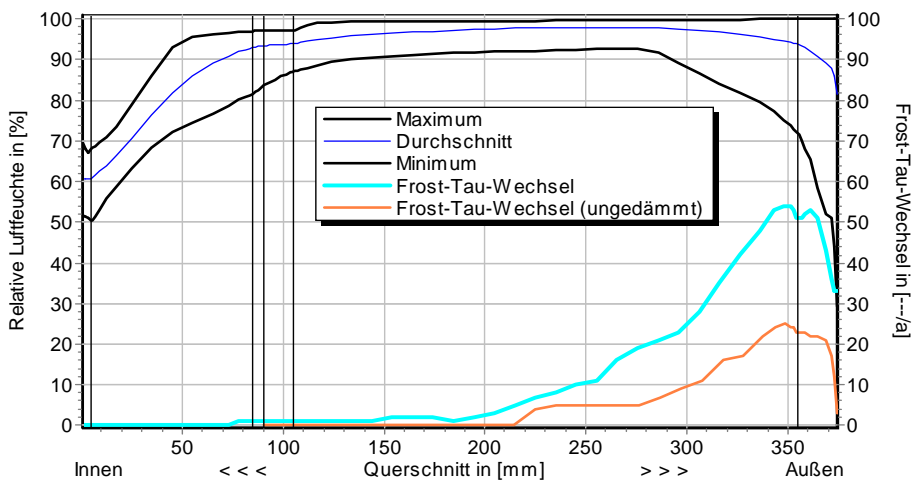


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



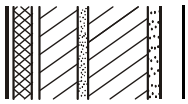
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	13	20	28
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,4	96,8	96,3
	WL_w	%	100	92,6	88,3	84,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	103,9	103,6	103,3
	CIL_φ	%	100	97,8	97,5	96,0
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	24	40	48	53
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,1	97,5	96,4
	WL_w	%	100	105,4	107,1	108,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,3	97,2	96,2
	CIL_φ	%	100	106,4	109,1	109,2



1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)		Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz		$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)		Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

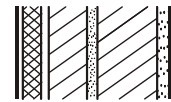
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen und bis einschließlich 50 mm Dämmung wegen fehlendem Mindestwärmeschutz nicht.
- COND: Nur die Variante mit 80 mm Dämmung erfüllt die DIN-Kriterien wegen nicht eingehaltener Mindestwärmeschutz. Die maximale Kondensatmenge und Verdunstung werden immer eingehalten.
- Simulation: Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Ohne Schlagregen werden maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge zu hohe Kondensatmengen, die Verdunstung des Kondensats ist immer gewährleistet. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

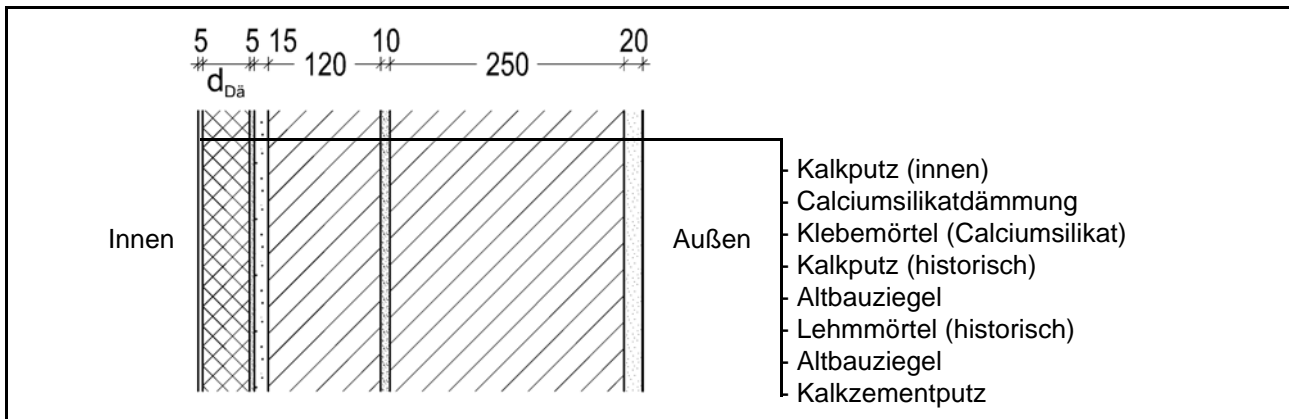
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30, 50 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

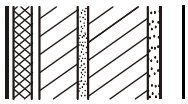
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,52	0,99	1,30	1,76
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,45	0,86	0,68	0,52
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,637	1,749	1,525
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,770	2,585	1,811
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,537	0,696	0,745	0,790

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,52	0,98	1,27	1,70
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,45	0,87	0,70	0,53
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,196	0,264	0,477
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,770	2,585	1,811
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	71,5	61,9	59,2	56,9
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5



1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

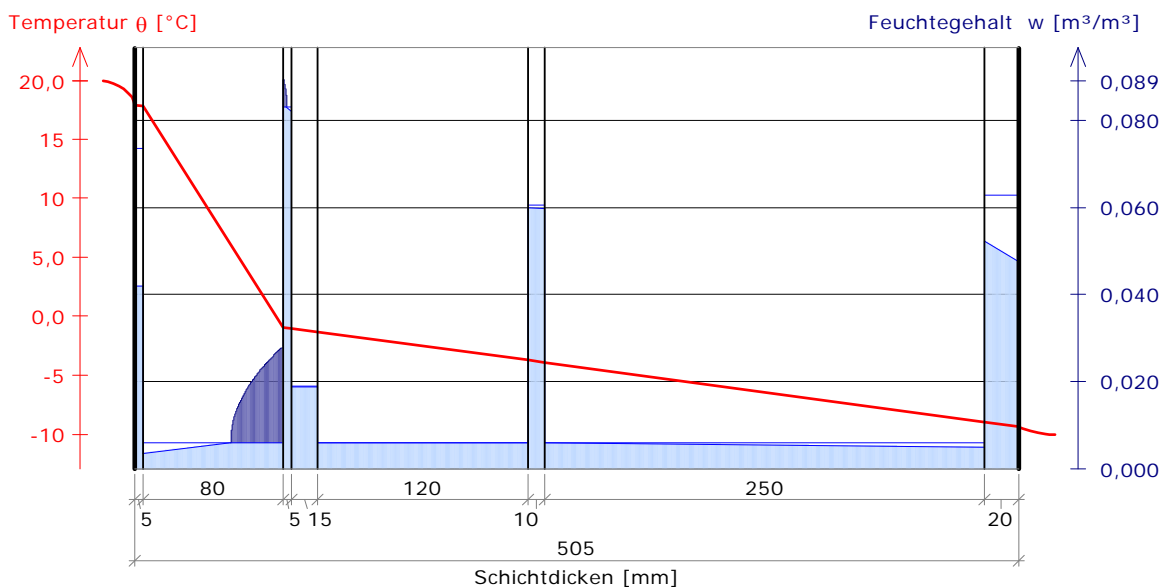
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R_{\text{vorh}} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{\text{W,T}} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{\text{W,T}} \leq m_{\text{W,V}}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{\text{Rsi}} \geq 0.7 /$ $\varphi_{\text{si}} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

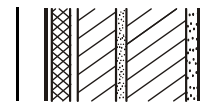
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,9	2054	1169	0,042		
				0,042		
2 Calciumsilikatplatte	17,8	2040	1164	0,003		
3 Klebemörtel (Calciumsilikat)	-1,0	566	566	0,028	30,6	0,46
				0,089	2,1	0,01
4 Kalkputz (historisch)	-1,0	562	555	0,082		
5 Altbauziegel				0,019		
	-1,3	548	538	0,019		
6 Lehmörtel (hist.)				0,006		
	-3,7	448	444	0,060		
7 Altbauziegel				0,060		
	-4,0	439	434	0,006		
8 Kalkzementputz				0,005		
	-9,0	285	236	0,052		
Luftschicht (Außenseite)				0,048		
	-9,4	275	208			
	-10	260	208			



1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

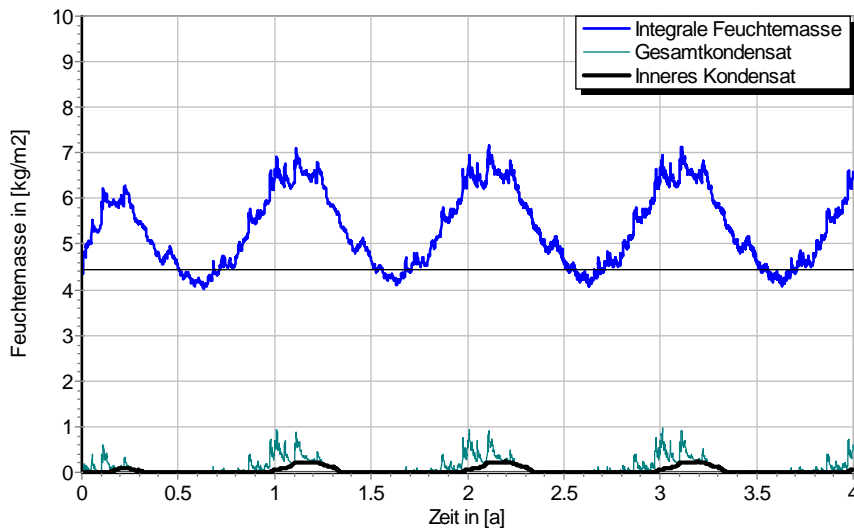


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



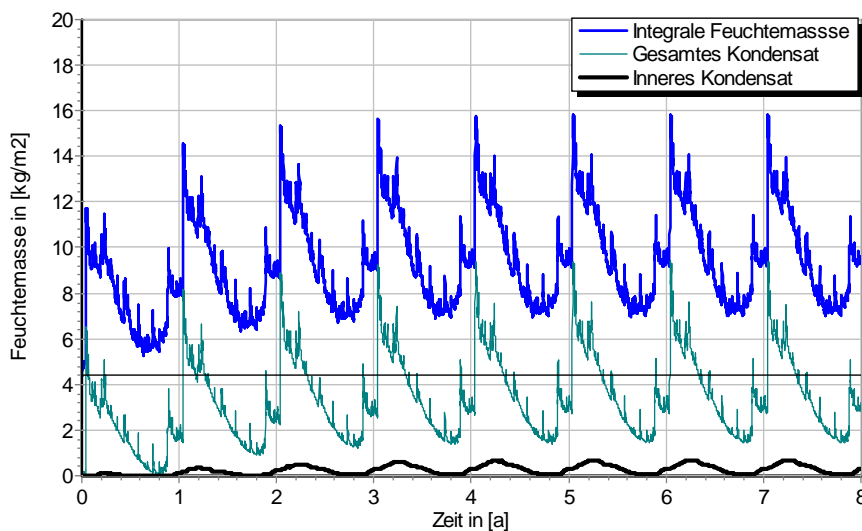
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm,
ohne Schlagregen

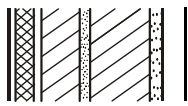
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,935	1,791	2,320	2,717
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,002	0,137	0,227



$\Delta m_{W,80}$

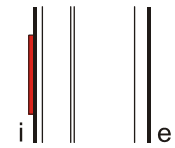
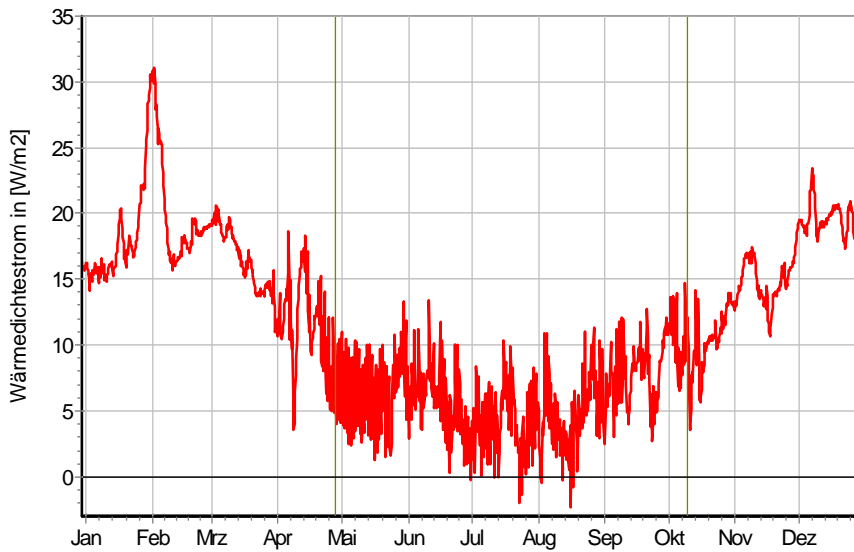
Wassermassen
für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm,
schlagregenexponiert

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,372	8,830	10,104	11,420
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,037	0,255	0,688



1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5.2 Instationäre Wärmeverluste

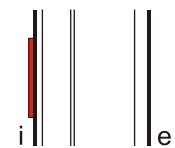
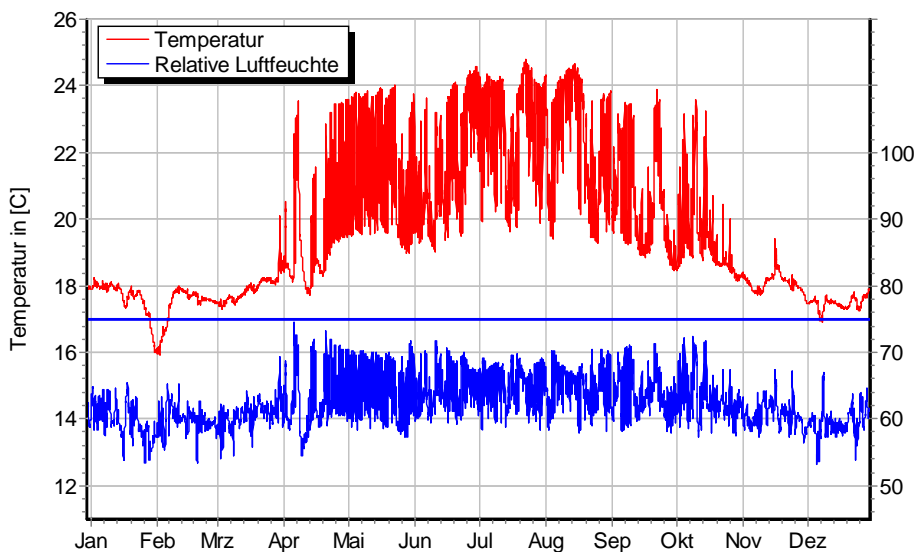


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,55	15,88	12,61	9,64
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,51	0,90	0,72	0,55
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	0,94	1,22	1,65

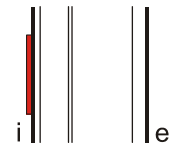
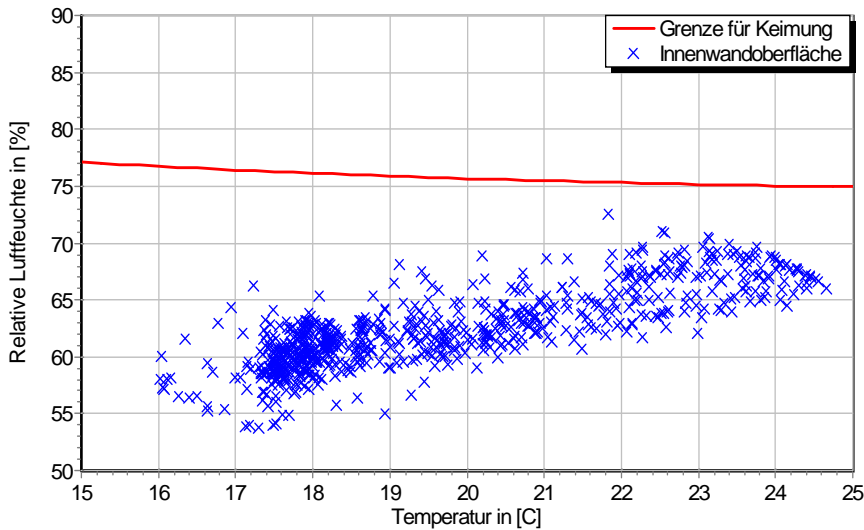
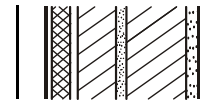
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,18	15,67	12,49	9,59
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,49	0,89	0,71	0,55
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,50	0,95	1,24	1,66

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

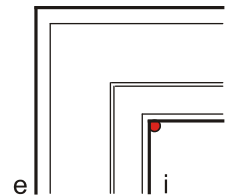
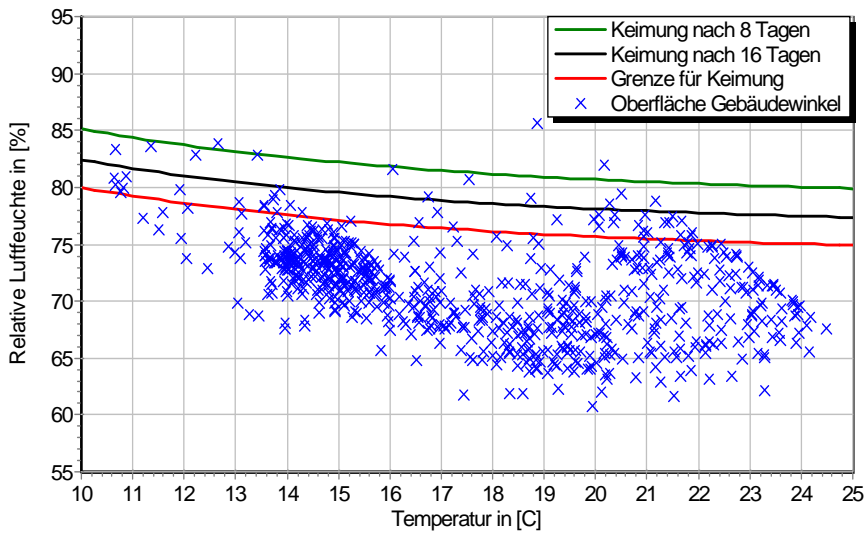


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

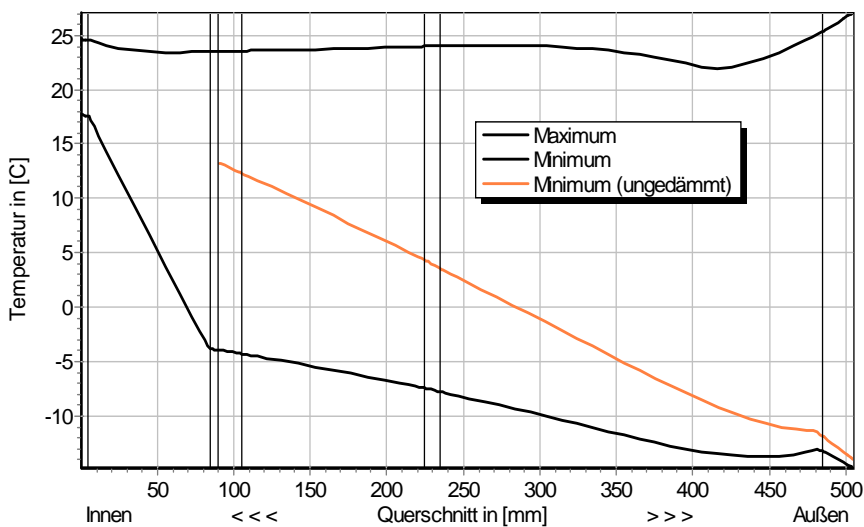


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

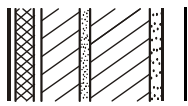


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

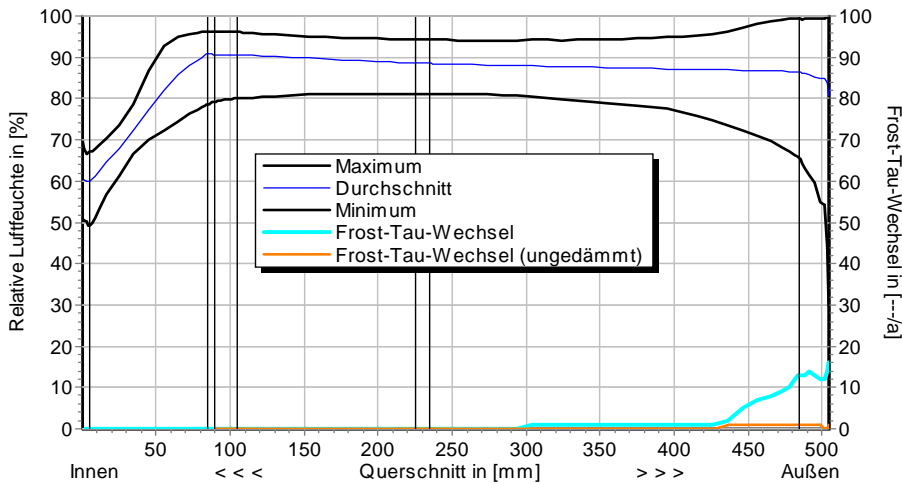
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



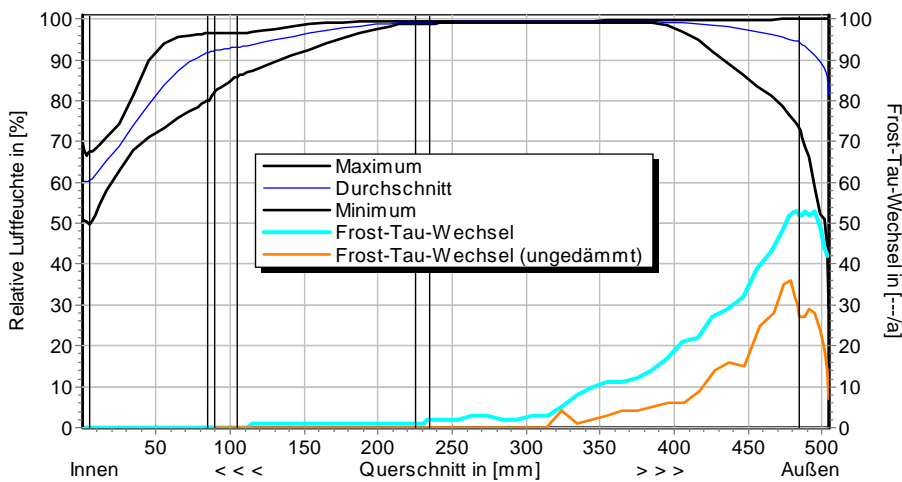
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

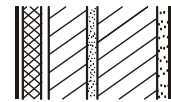


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	18	20	23	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,2	97,7	97,2	
	WL_w	%	100	90,5	85,6	81,7	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,3	101,3	101,3	
	CIL_φ	%	100	98,9	97,4	96,0	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	27	45	51	53	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,5	98,0	97,1	
	WL_w	%	100	103,2	104,7	105,9	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,6	98,1	97,7	
	CIL_φ	%	100	104,9	105,0	105,2	

1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	-Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	✗	✗	✗	✗
COND	✗	✗	✓	✓
Simulation - ohne Schlagregen	✗	✗	✓	✓
Simulation - schlagregenexponiert	✗	✗	✓	○

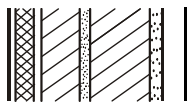
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien. Der Mindestwärmeschutz ist erst ab 50 mm Dämmung gegeben, die Kondensatmengen sind ab 50 mm Dämmung zu hoch.
- COND: Nur die Variante mit 30 mm Dämmung erfüllt nicht die DIN-Kriterien wegen nicht eingehaltenem Mindestwärmeschutz.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Ohne Schlagregeneinfluss werden die Kondensatmengen und Verdunstung eingehalten.
Bei schlagregenexponierten Konstruktionen verdunstet mit 80 mm Dämmung das innere Kondensat nicht vollständig.
Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

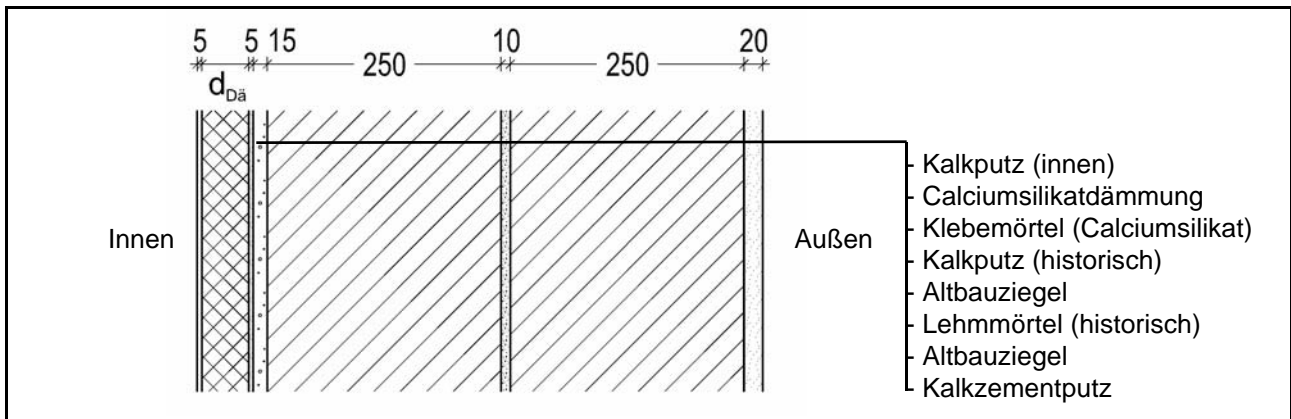
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineraldämmplatten: 6.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.5
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30, 50 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

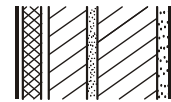
	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,68	1,16	1,46	1,93
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,17	0,75	0,61	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,995	1,394	1,328
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,770	2,670	1,776
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,590	0,719	0,761	0,800

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,68	1,15	1,44	1,87
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,17	0,76	0,62	0,49
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,474	0,422	0,419
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,770	2,670	1,776
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	60,2	58,2	56,3
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5

1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



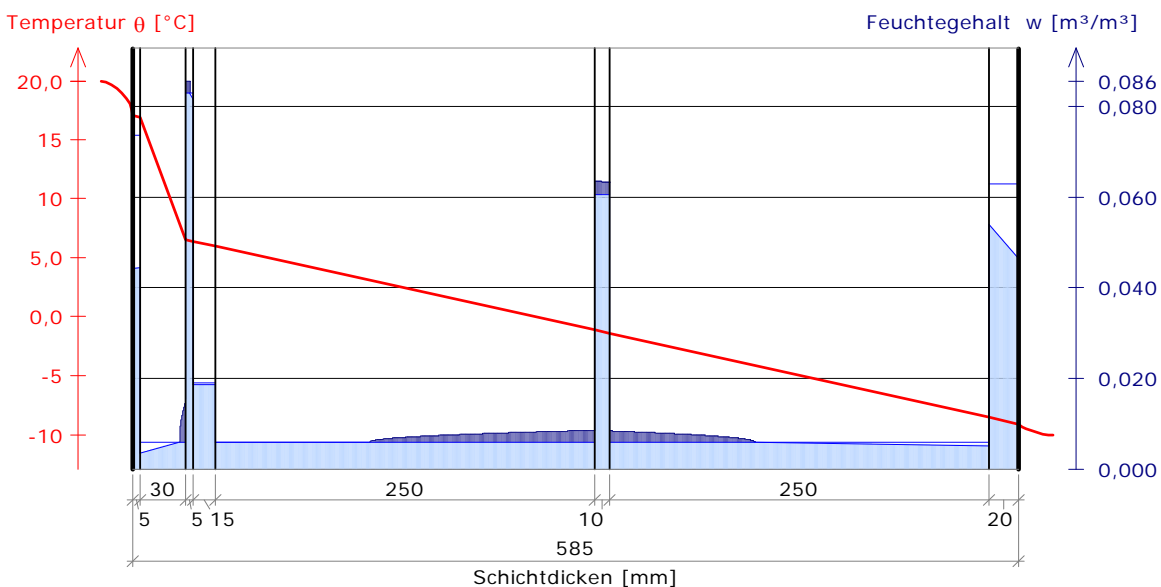
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

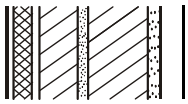
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,0	1943	1169	0,044		
				0,044		
2 Calciumsilikatplatte	16,9	1925	1161	0,004		
				0,016	4,7	0,03
3 Klebemörtel (Calciumsilikat)	6,5	970	970	0,086	0,4	0,00
				0,082		
4 Kalkputz (historisch)	6,4	963	947	0,019		
				0,019		
5 Altbauziegel	6,0	935	919	0,006		
				0,009	148,6	0,26
6 Lehmörtel (hist.)	-1,1	558	558	0,063	10,0	0,03
				0,063		
7 Altbauziegel	-1,4	544	544	0,008	95,5	0,16
				0,005		
8 Kalkzementputz	-8,5	296	255	0,054		
				0,046		
Luftschicht (Außenseite)	-9,1	282	208			
	-10	260	208			





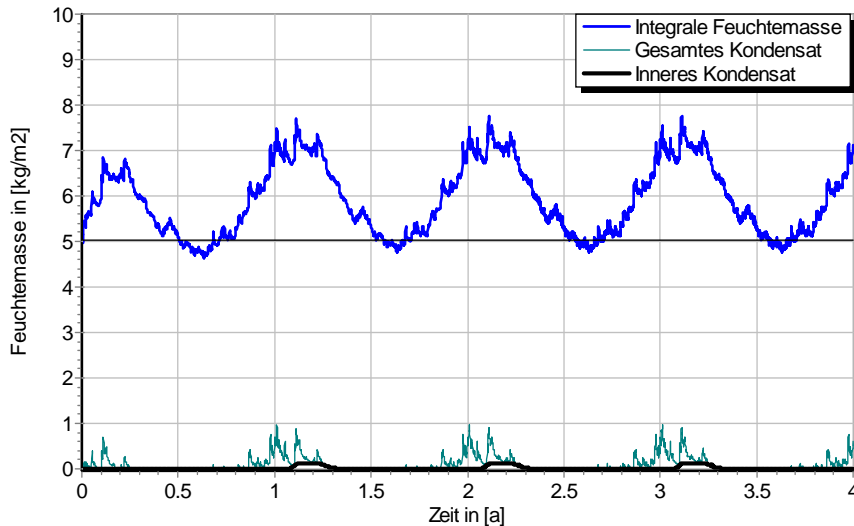
1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



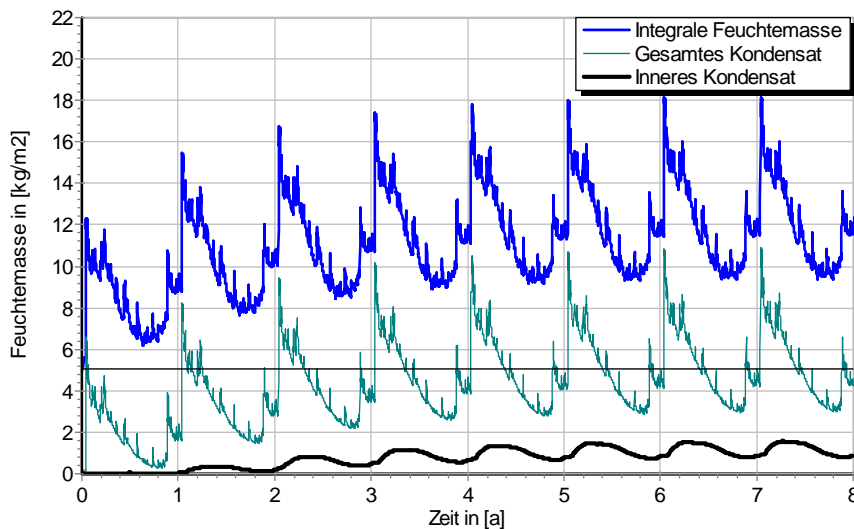
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	1,130	1,446	2,218	2,704
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,005	0,145

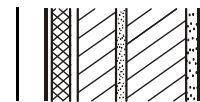


$\Delta m_{W,80}$

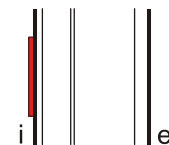
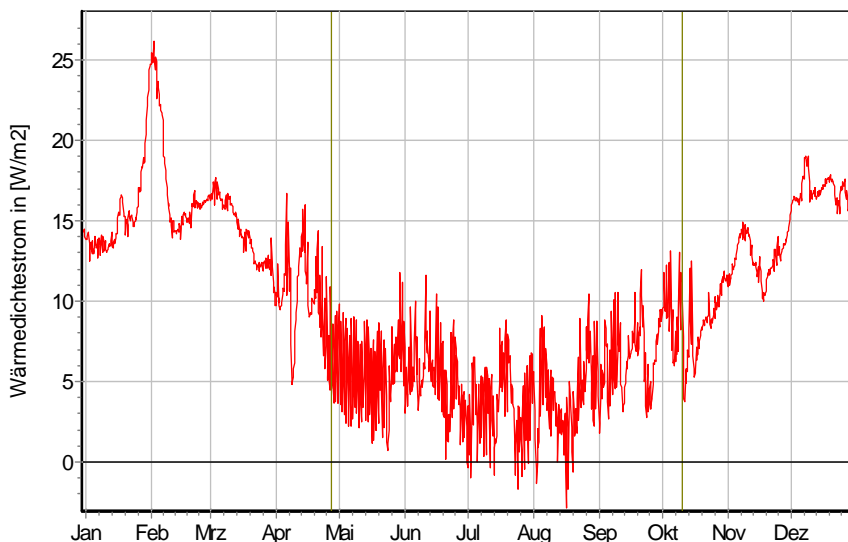
Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,857	10,450	11,539	13,179
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,545	0,791	1,605

1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

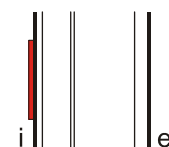
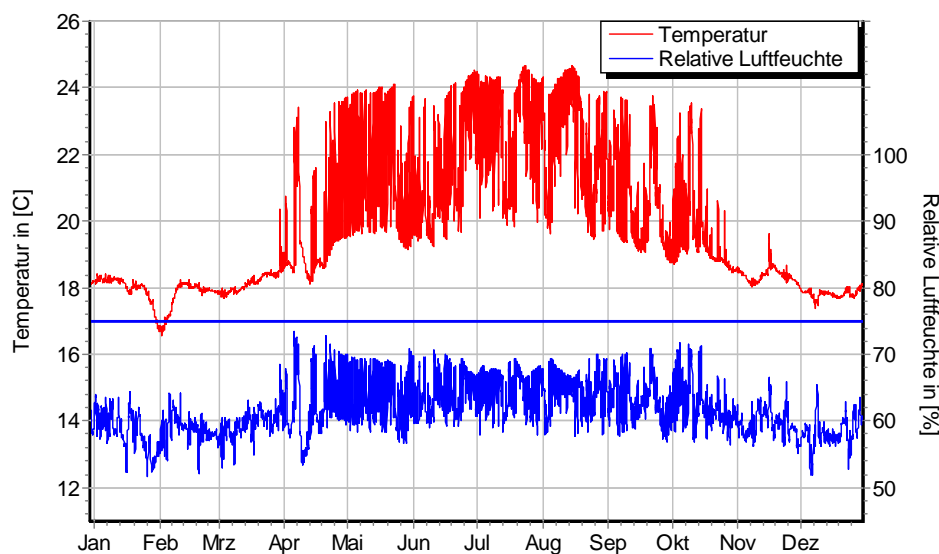


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

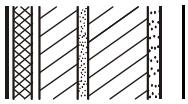
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,48	13,87	11,28	8,83
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,01	0,79	0,64	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,82	1,10	1,39	1,82

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,17	13,58	11,16	8,77
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,00	0,77	0,63	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,83	1,12	1,41	1,84

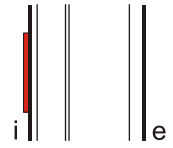
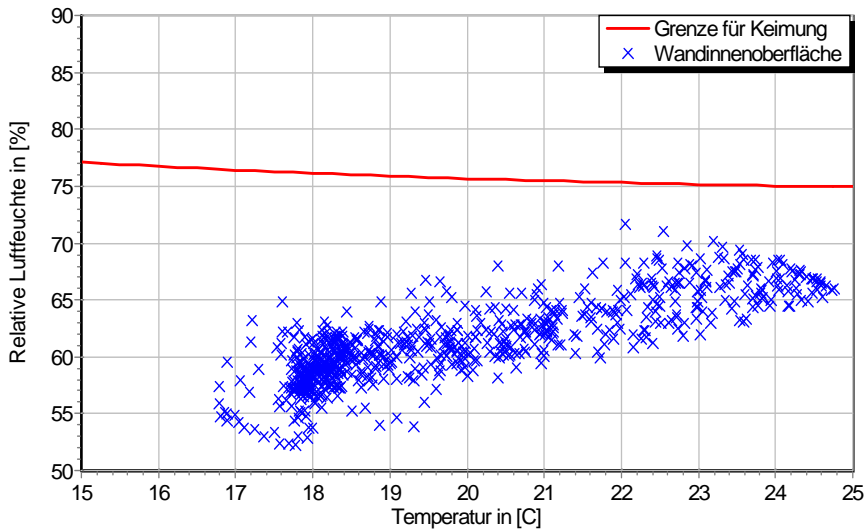
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



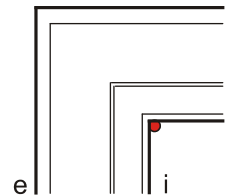
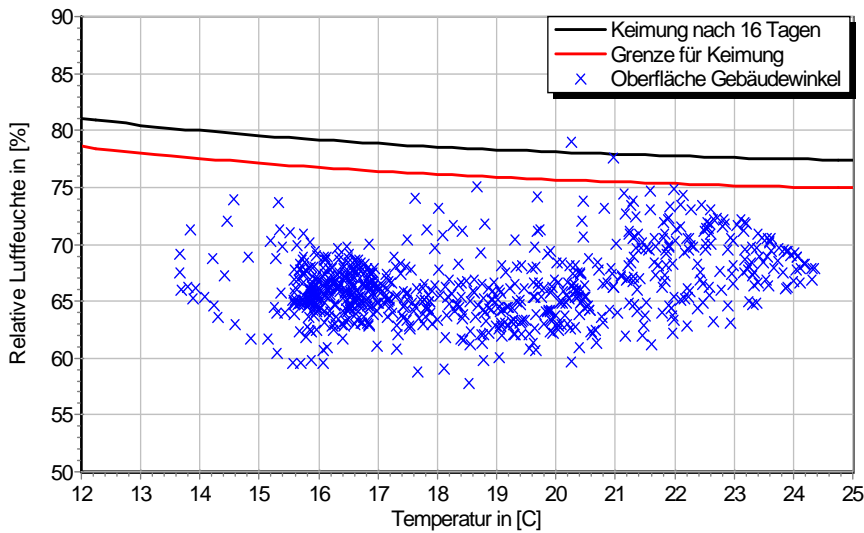
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

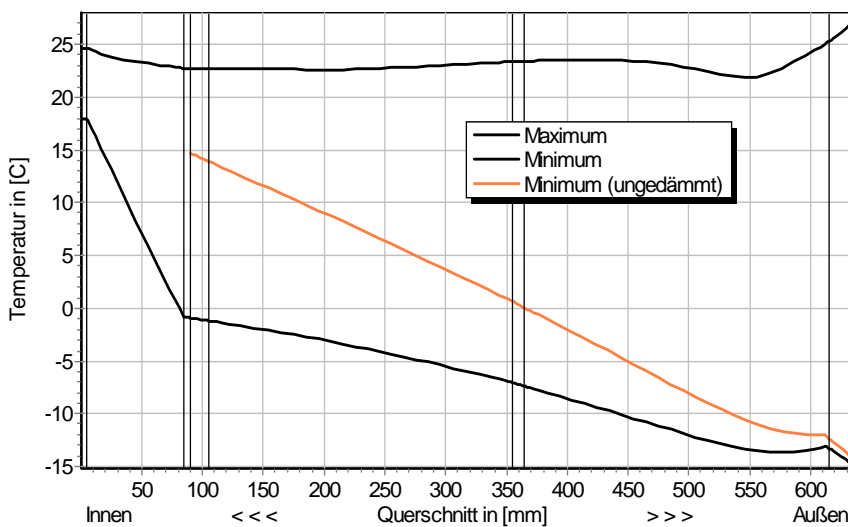


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



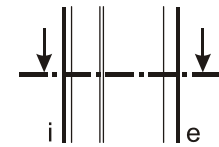
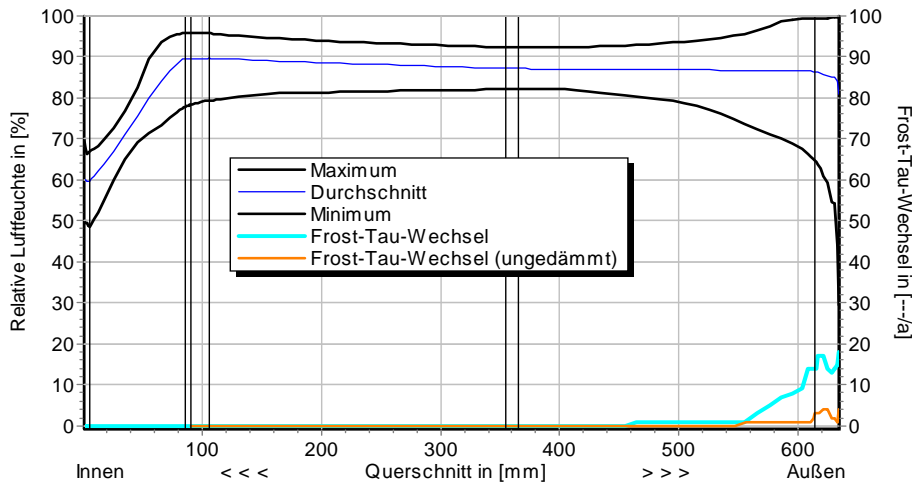
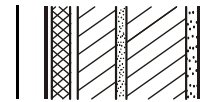
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

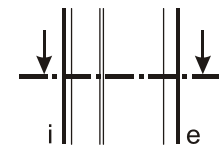
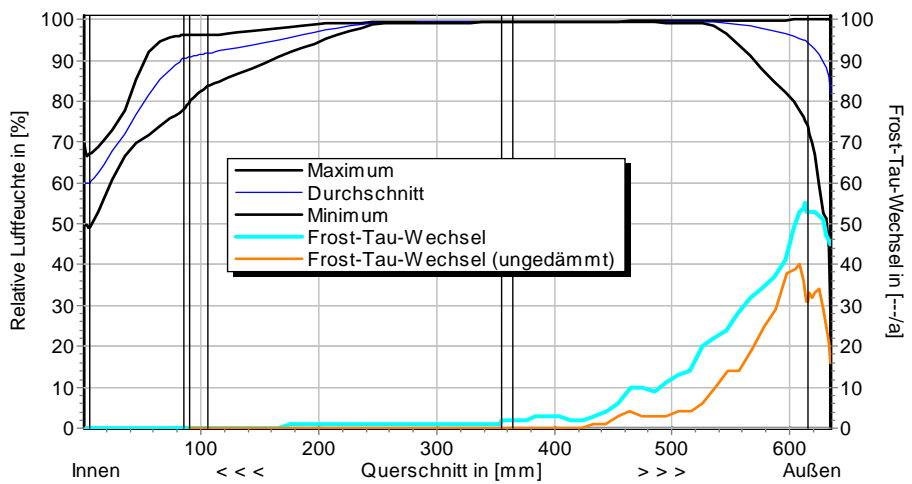


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



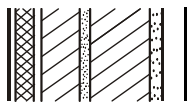
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	18	23	28
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,8	98,5	98,2
	WL_w	%	100	90,9	97,3	95,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	100,8	101,0	101,0
	CIL_φ	%	100	98,5	97,3	95,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	42	53	58
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	100,7	98,7	98,3
	WL_w	%	100	99,9	103,5	104,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	99,5	98,8	98,7
	CIL_φ	%	100	99,8	102,4	102,6



1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	-Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

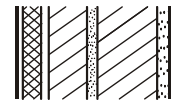
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien: Mit 30 mm Dämmung wegen fehlendem Mindestwärmeschutz und ab 50 mm Dämmung wegen zu hoher Kondensatmenge.
- COND: Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten. Alle anderen gedämmten Varianten erfüllen die DIN-Kriterien.
- Simulation: Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten. Die anderen gedämmten Varianten erfüllen ohne Schlagregeneinfluss alle Kriterien.
Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge ist die Verdunstung des Kondensats bei allen gedämmten Varianten nicht gewährleistet und mit 80 mm Dämmung entstehen zu hohe Kondensatmengen.
Bei den gedämmten Varianten ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

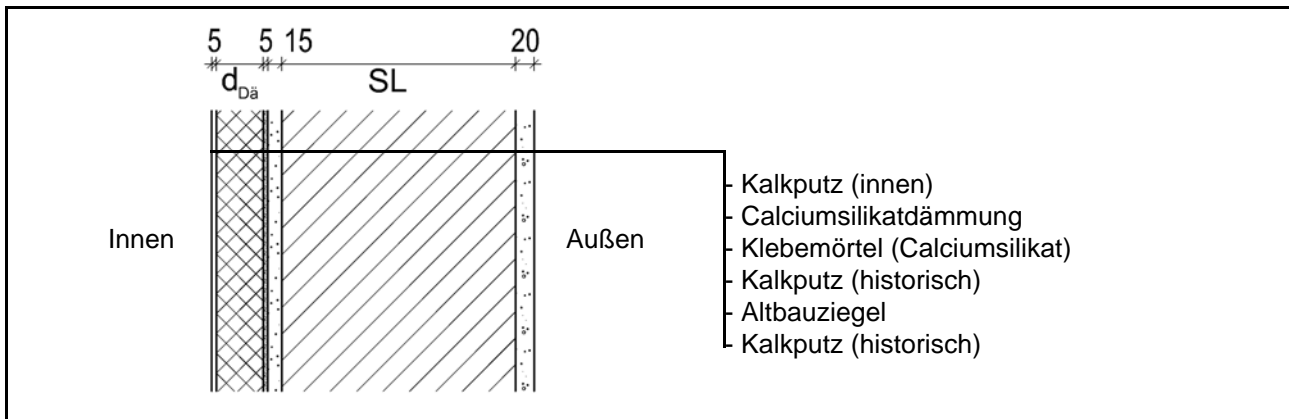
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralfaserplatten: 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht und Steinlänge (SL): $d_{Dä} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

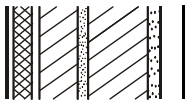
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanziert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	0,83	1,30	1,92
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	1,00	0,68	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,396	1,749	1,327
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,754	2,587	1,778
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,667	0,745	0,800

* mit $R_{si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanziert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	0,81	1,27	1,87
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	1,02	0,70	0,49
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,162	0,253	0,403
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,754	2,587	1,778
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	64,2	59,2	56,3
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5



1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

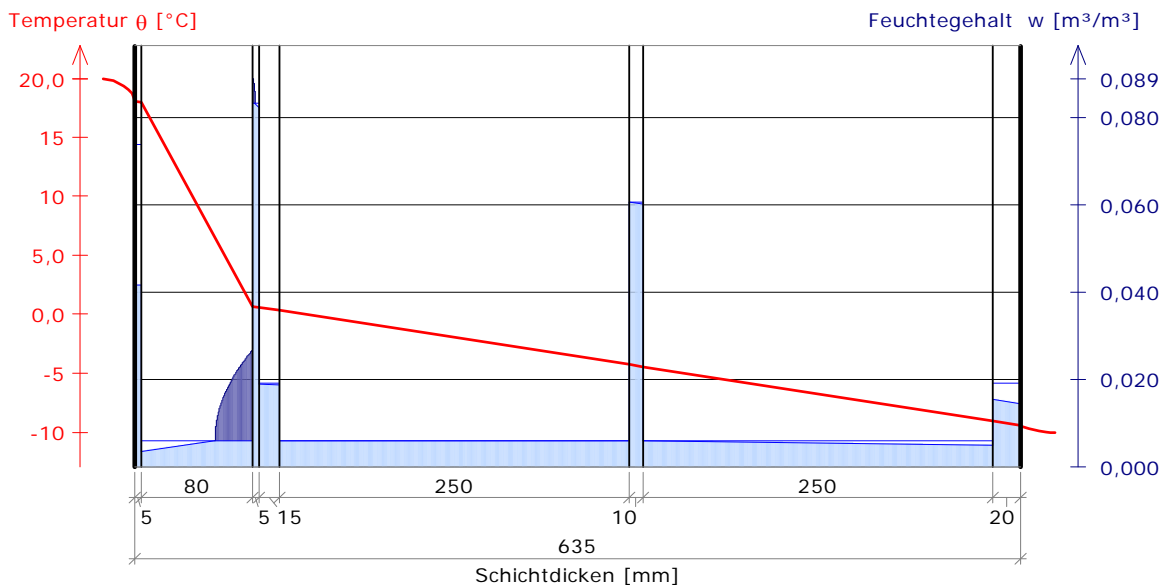
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{Si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

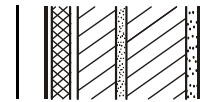
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,1	2076	1169	0,041		
				0,042		
2 Calciumsilikatplatte	18,0	2063	1164	0,003		
3 Klebemörtel (Calciumsilikat)	0,7	642	642	0,027	27,6	0,38
				0,089	1,9	0,01
4 Kalkputz (historisch)	0,6	638	632	0,082		
5 Altbauziegel	0,3	626	615	0,019		
				0,006		
6 Lehmörtel (historisch)	-4,3	428	427	0,006		
7 Altbauziegel	-4,5	421	418	0,060		
				0,006		
8 Kalkputz (historisch)	-9,1	283	230	0,005		
				0,015		
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	274	208	0,014		
	-10	260	208			



1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

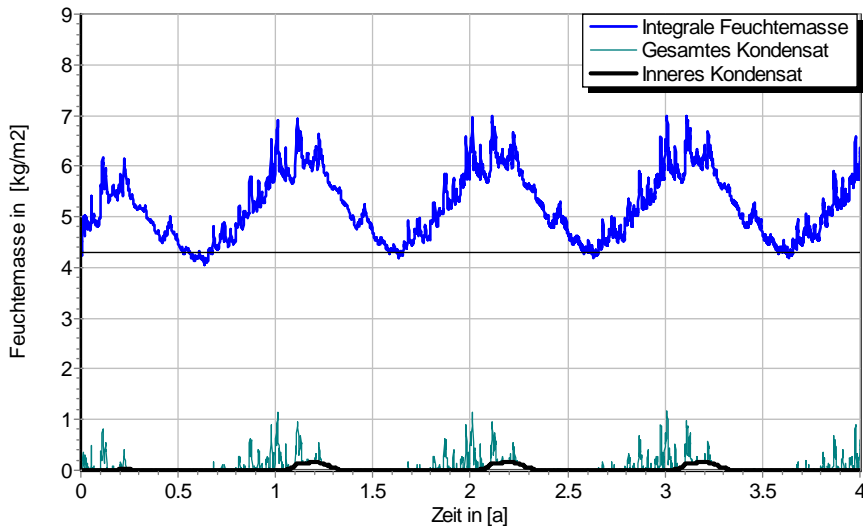


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

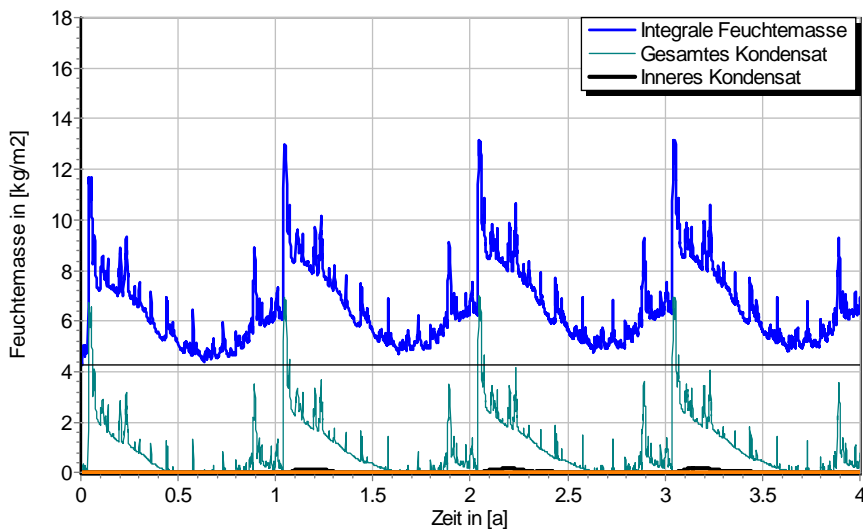


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

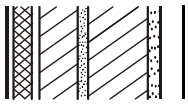
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	1,836	2,324	2,694
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,186	0,144	0,163



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante (2 SL) in orange

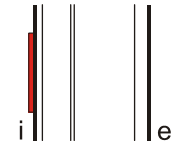
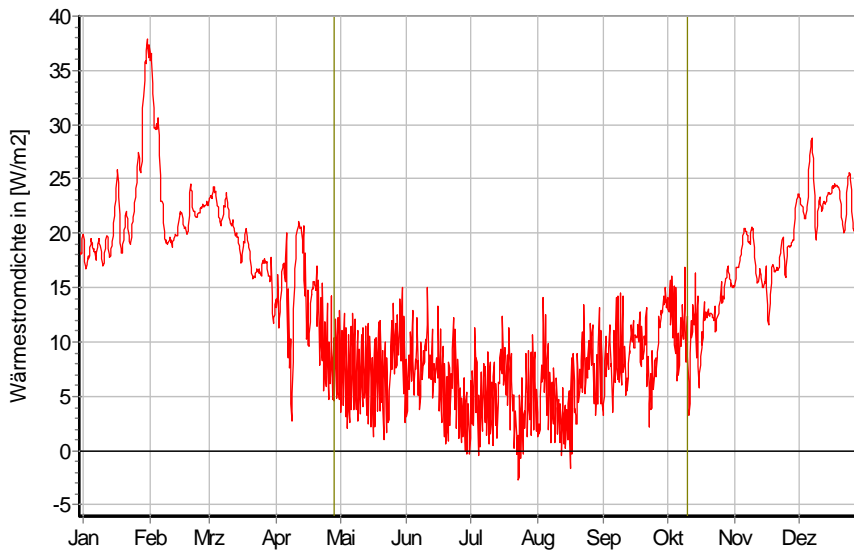
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	7,774	8,286	8,874
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,002	0,521*	0,142*	0,177*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

5.2 Instationäre Wärmeverluste

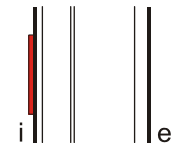
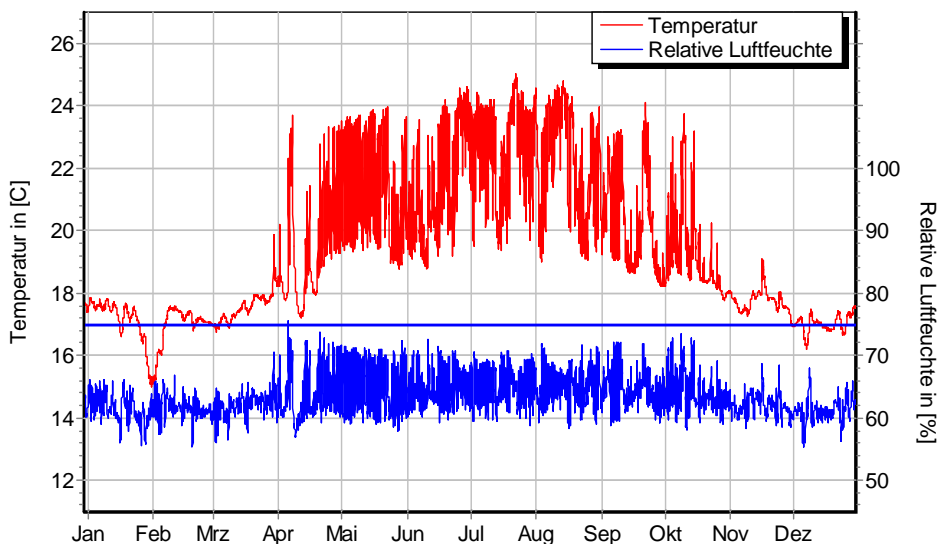


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,95	18,75	12,63	8,83
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,99	1,07	0,72	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,77	1,22	1,82

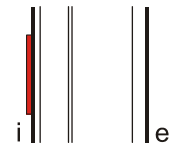
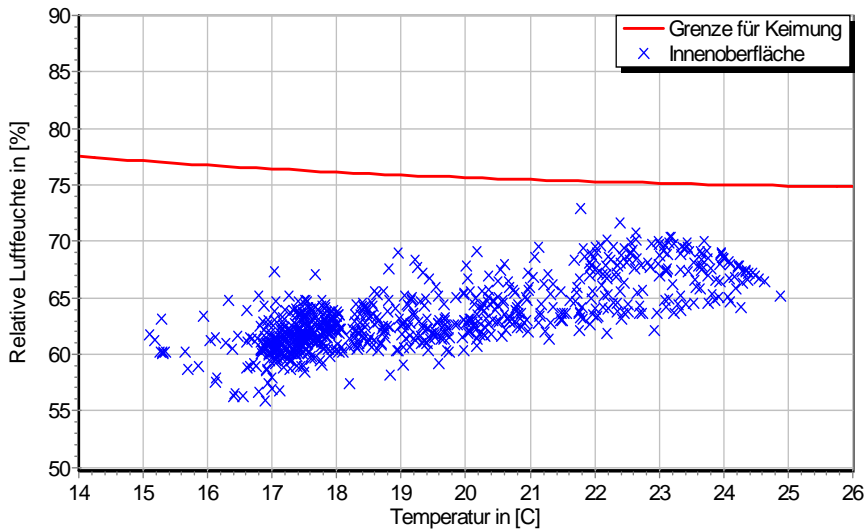
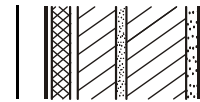
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,42	18,45	12,42	8,70
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	1,05	0,71	0,49
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,78	1,25	1,85

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

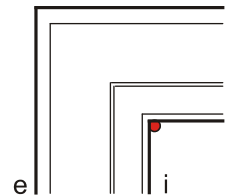
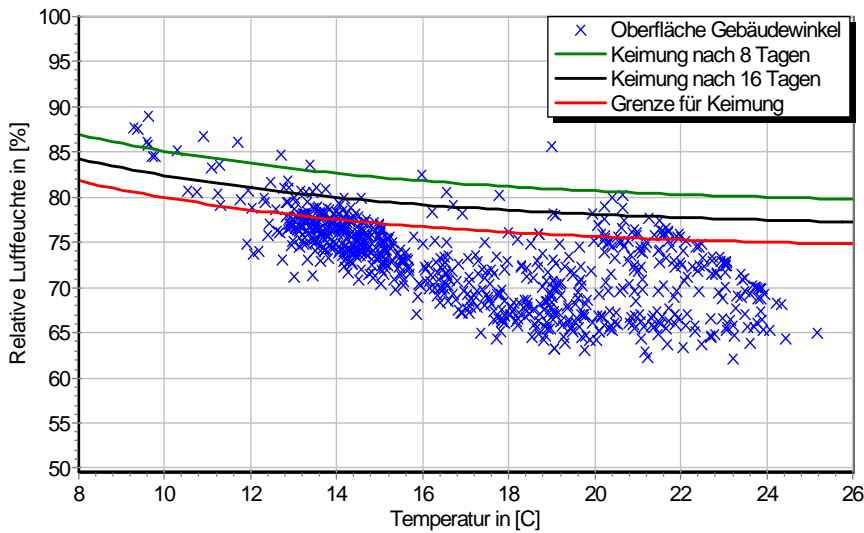


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

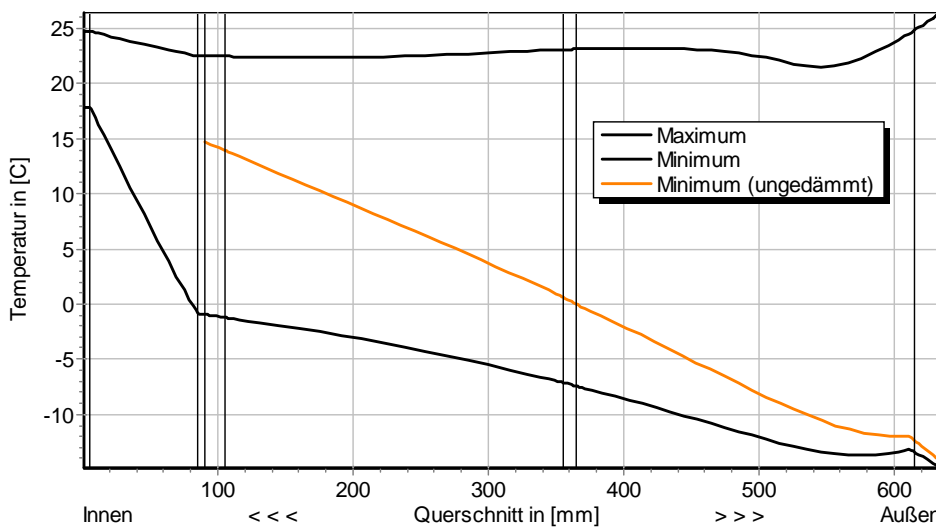


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

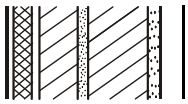


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

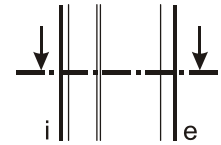
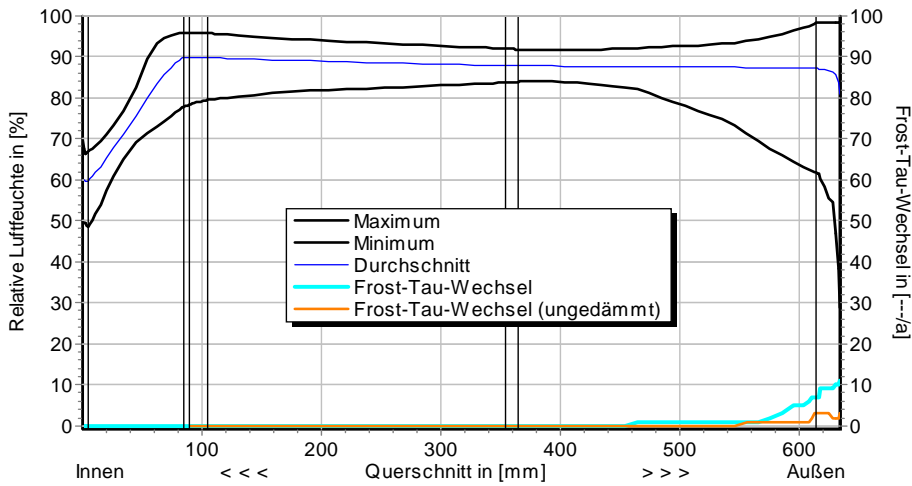
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



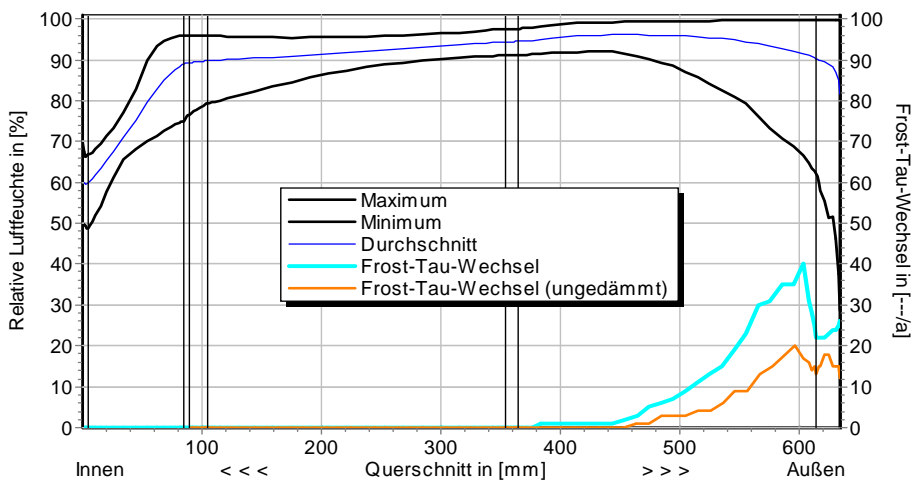
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

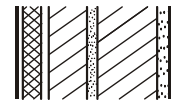


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	0	0	1	5
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,5	97,8	98,0
	WL_w	%	100	91,1	77,1	70,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	102,3	100,0	100,4
	CIL_{φ}	%	100	95,9	97,0	96,0
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	13	19	25	31
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,5	97,8	98,0
	WL_w	%	100	107,1	105,8	103,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,2	97,1	98,0
	CIL_{φ}	%	100	97,5	99,4	98,4

1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

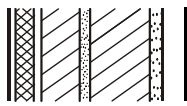
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, mit nur 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- COND: Die Varianten mit 50 (1½ SL) und 80 mm (2 SL) Dämmung erfüllen die DIN-Kriterien, mit nur 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Selbst mit Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung eingehalten. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke.

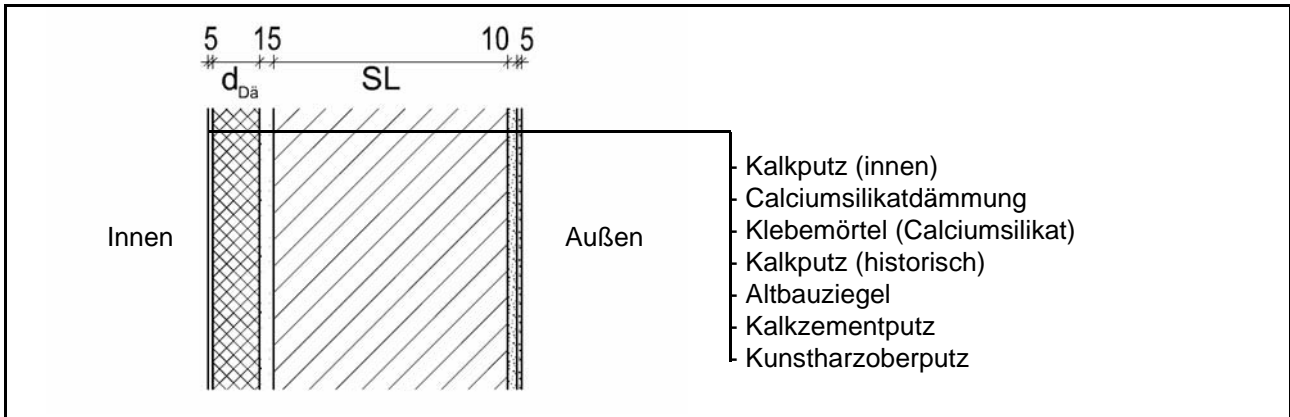
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht und Steinlänge (SL): $d_{Dä} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² ·s ^{0,5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033
Kunstharzoberputz	1100	0,70	350	1,0	11,1	0,002

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

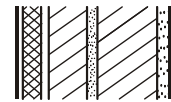
	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	0,82	1,30	1,92
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	1,01	0,68	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,553	1,840	1,380
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,872	2,772	1,972
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,666	0,744	0,801

* mit $R_{Si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	0,82	1,28	1,90
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	1,01	0,69	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,630	1,379	1,093
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,872	2,772	1,972
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	64,2	59,2	56,2
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5

1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



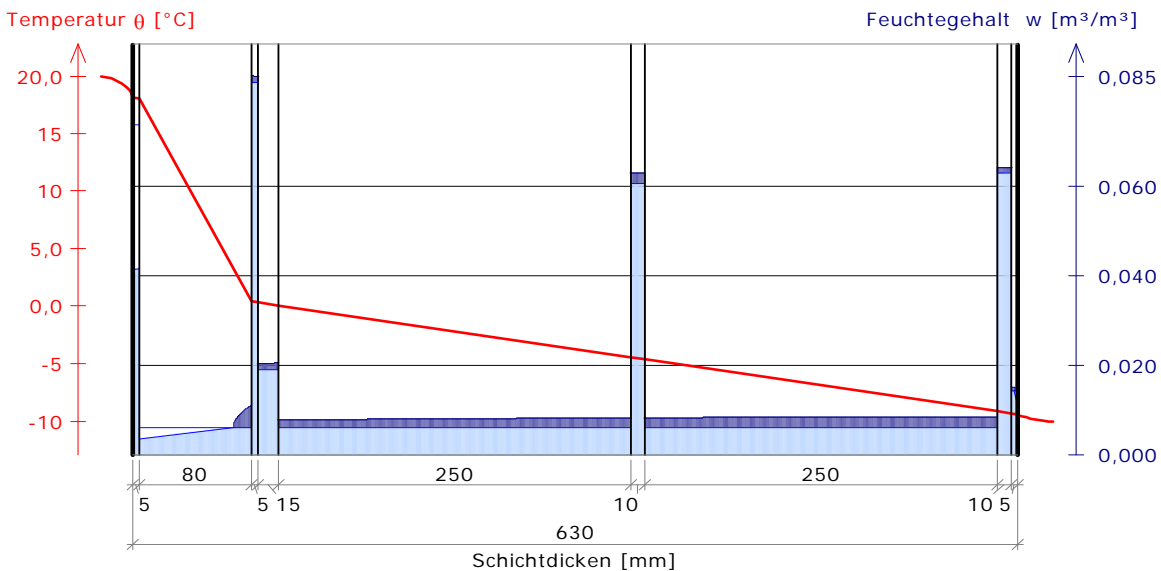
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

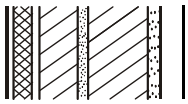
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ mit 2 Steinlängen

	Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
	Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1	Kalkputz (innen)	18,1	2079	1169	0,041		
					0,042		
2	Calciumsilikatplatte	18,0	2067	1167	0,003		
					0,012	15,2	0,06
3	Klebemörtel (Klimaplatte)	0,4	629	629	0,085		
					0,084	5,0	0,01
4	Kalkputz (historisch)	0,3	626	626	0,020		
					0,020	15,0	0,02
5	Altbauziegel	0,1	614	614	0,007		
					0,008	250,0	0,43
6	Lehmmörtel (historisch)	-4,4	422	422	0,063		
					0,063	10,0	0,02
7	Altbauziegel	-4,6	415	415	0,008		
					0,008	250,0	0,54
8	Kalkzementputz	-9,1	280	280	0,064		
					0,064	10,0	0,01
9	Kunstharzoberputz	-9,3	276	276	0,015		
					0,011	0,0	0,00
	Luftschicht (Kaltseite)	-9,4	274	208			
		-10	260	208			





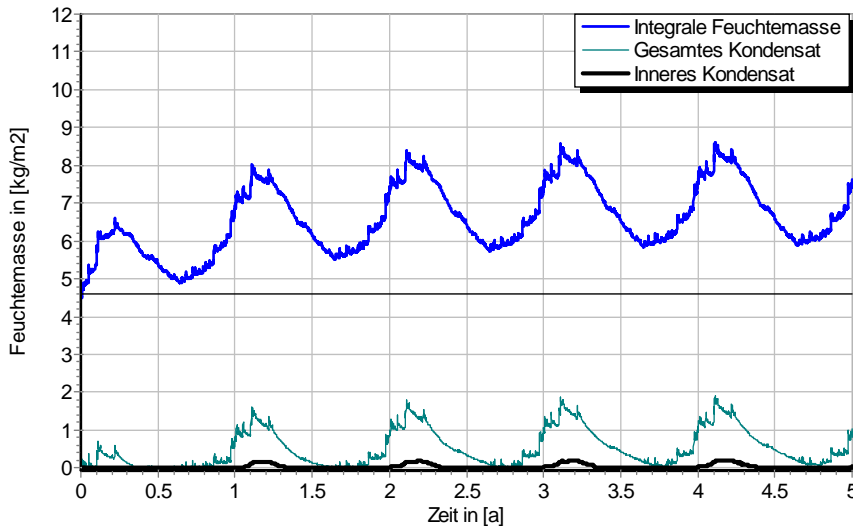
1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



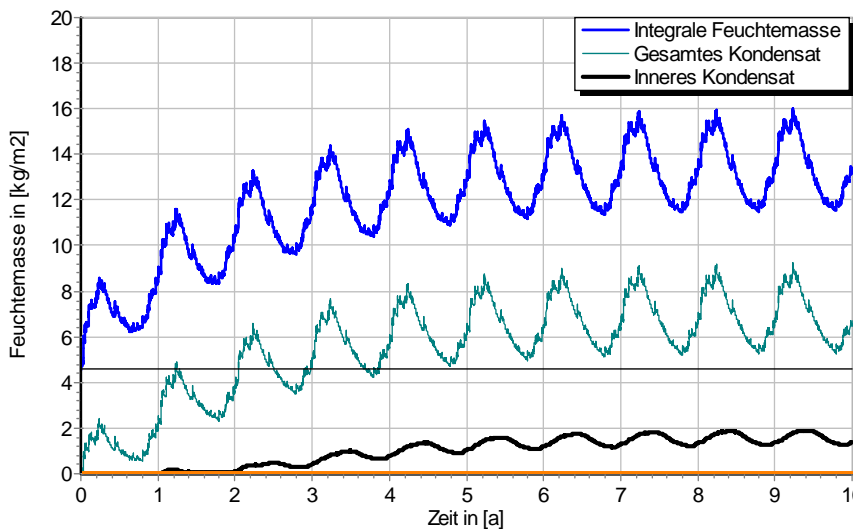
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	1,890	2,653	4,069
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,169	0,141	0,198



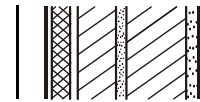
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der un sanierten Variante (2 SL) in orange

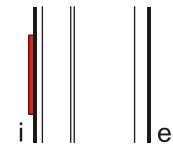
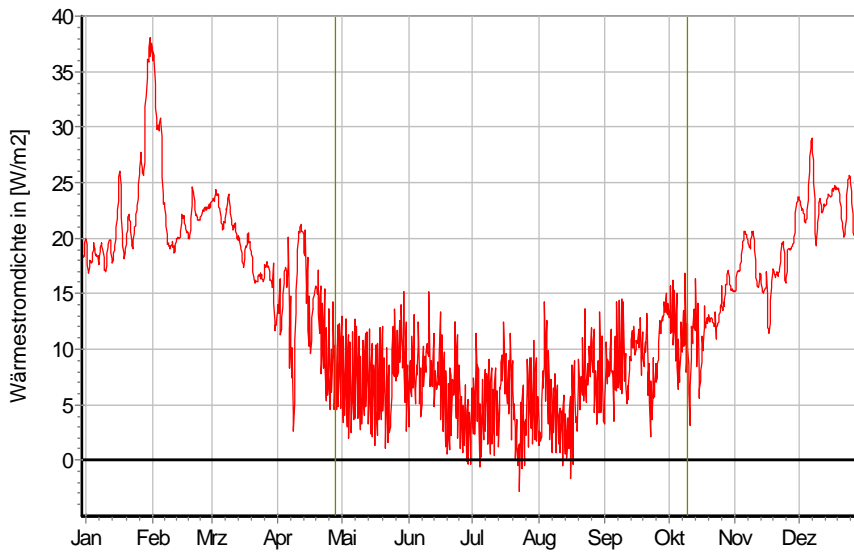
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	3,808	6,802	11,414
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	0,097*	0,238*	1,909*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

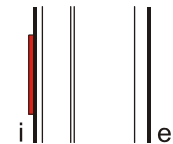
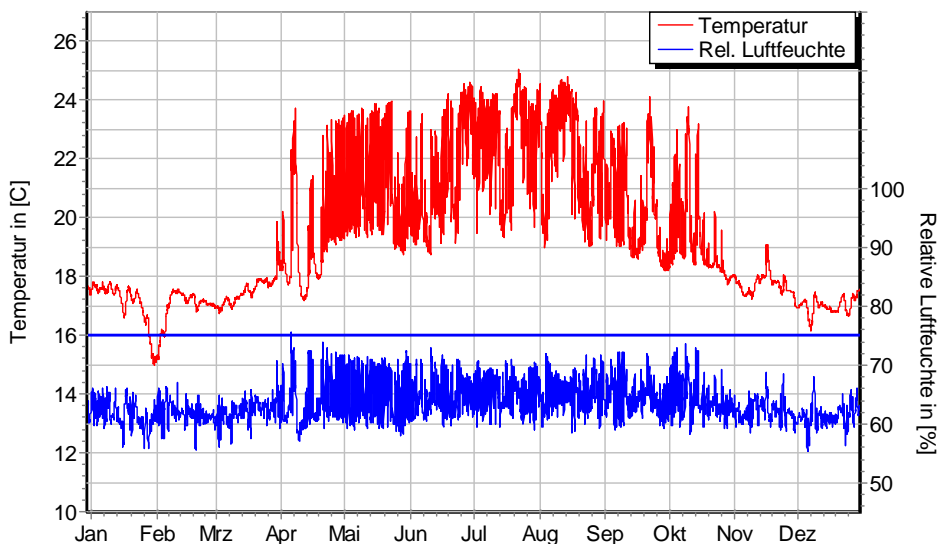


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

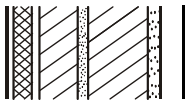
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,9	18,84	12,69	8,89
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	1,07	0,72	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,76	1,22	1,81

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	18,48	12,49	8,78
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	1,05	0,71	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,78	1,24	1,83

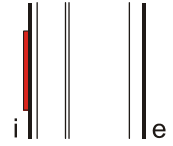
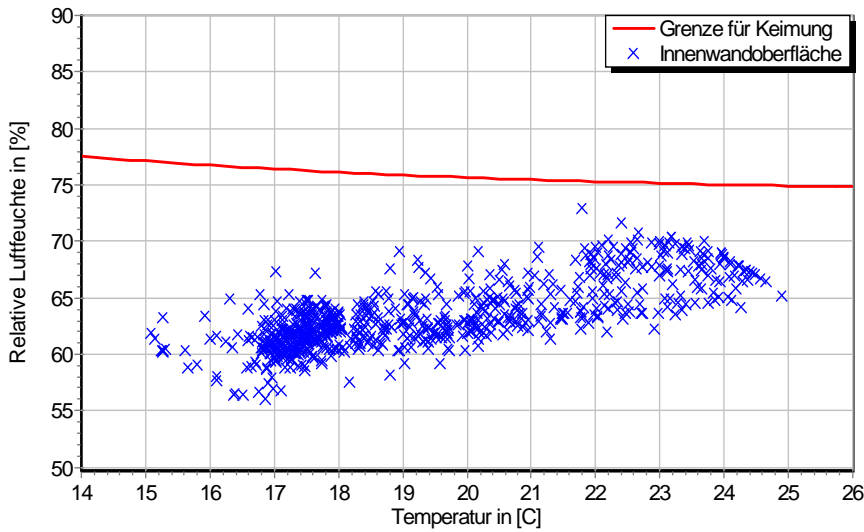
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



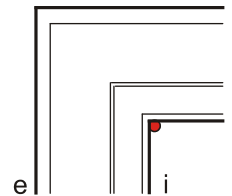
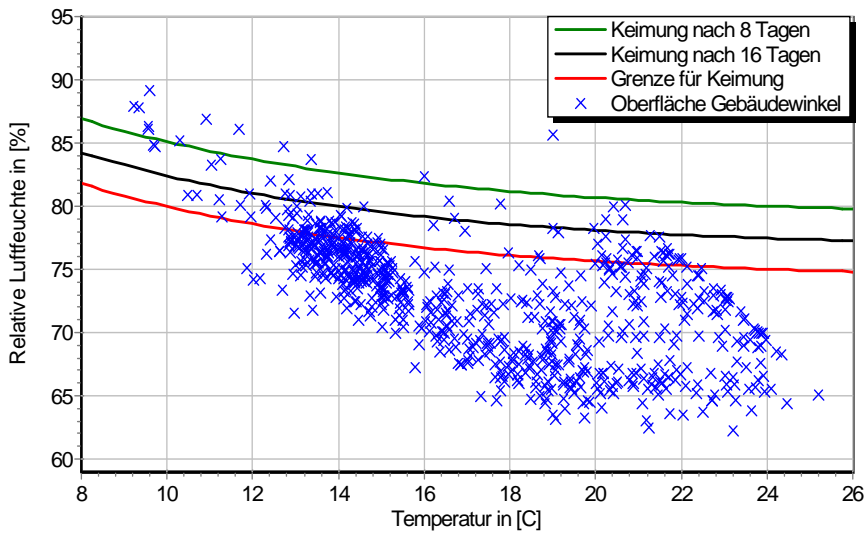
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

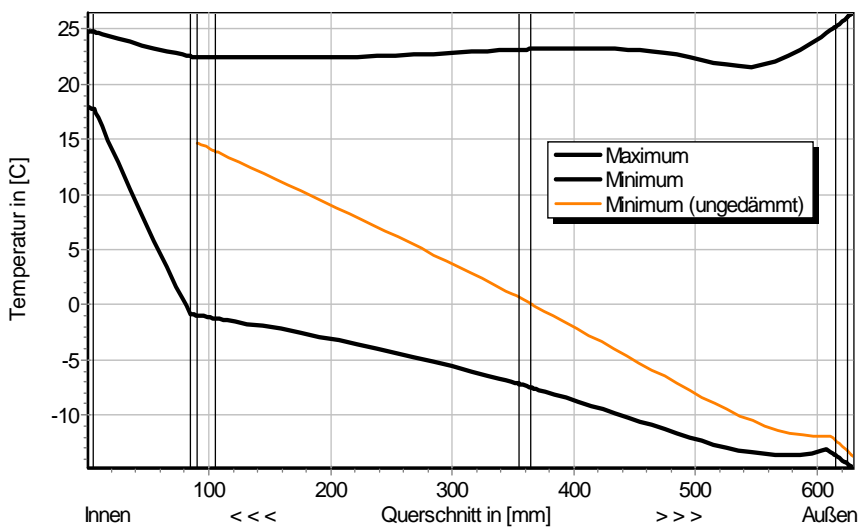


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



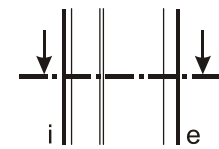
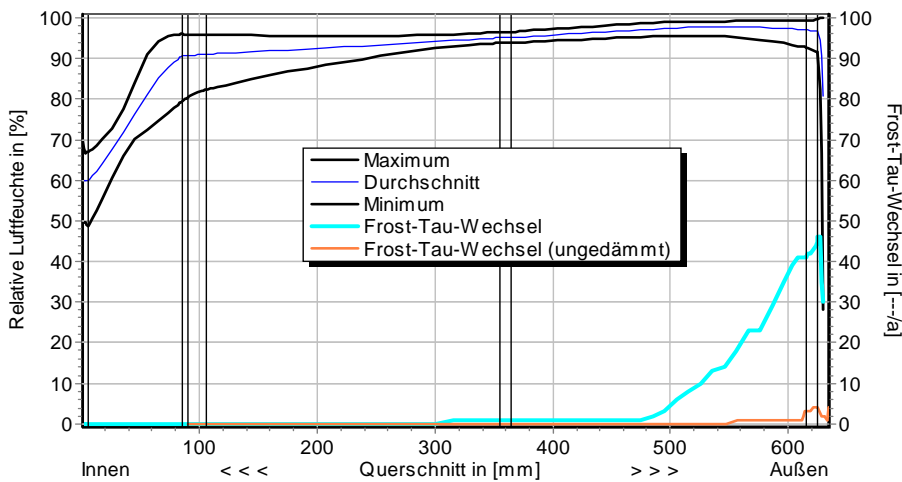
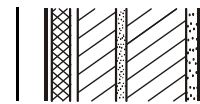
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

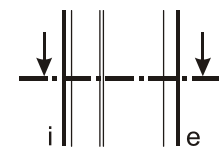
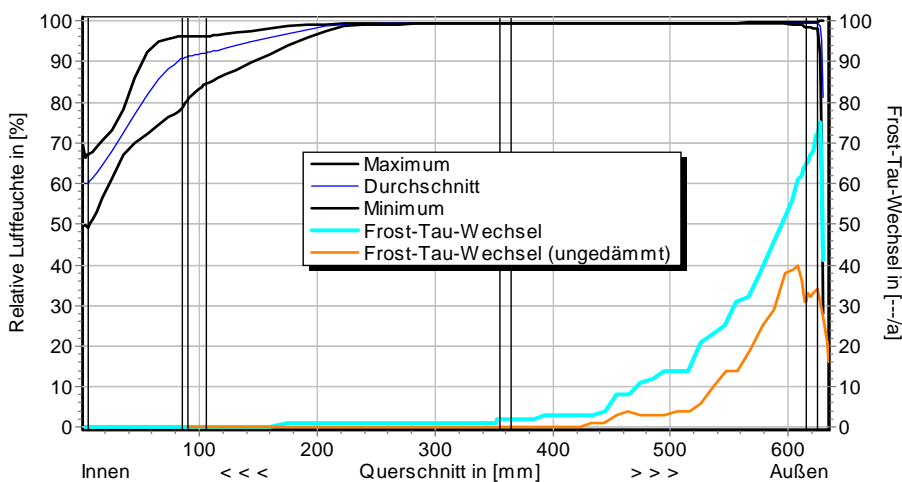


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



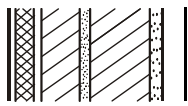
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	7	15	21
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	92,5	98,8	99,2
	WL_w	%	100	86,3	81,7	84,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,3	98,6	97,9
	CIL_φ	%	100	128,9	127,2	125,7
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	31	43	51
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	99,7	99,6	99,9
	WL_w	%	100	147,9	148,0	148,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,4	96,2	96,7
	CIL_φ	%	100	139,0	131,2	125,9



1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- $\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

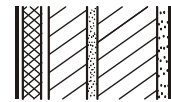
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, bis einschließlich 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, bis einschließlich 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm (1½ SL) gegeben. Ohne und mit Schlagregeneinfluss werden bei jeder Dämmvariante die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung, mit Ausnahme bei 80 mm Dämmung (2 SL) und Schlagregeneinfluss, eingehalten. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Verdunstung bei 80 mm überprüfen).

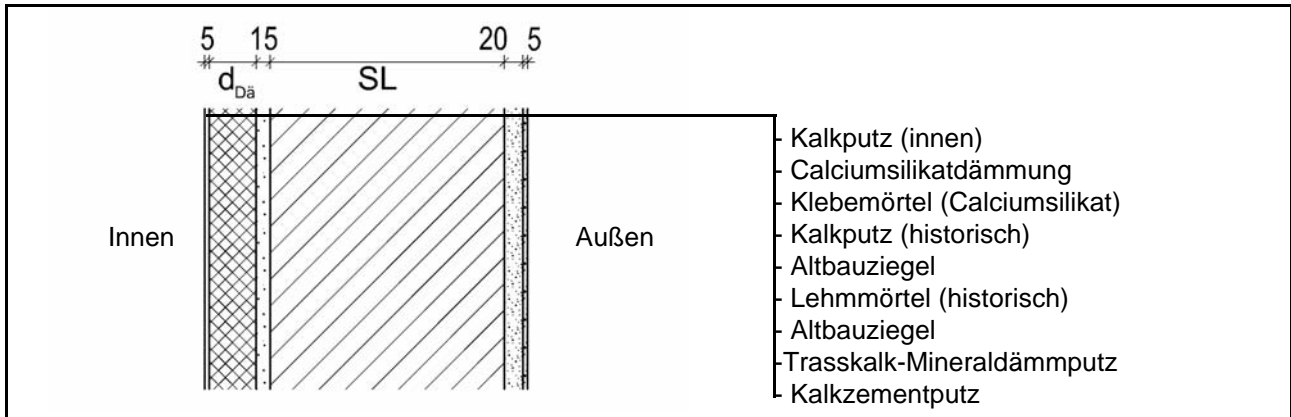
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30mm/1 SL, 50mm/1½ SL, 80mm/2 SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0,5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Trasskalk-Mineraldämmputz	610	0,10	6,9	6,0	48,7	0,211
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

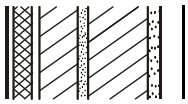
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	1,01	1,48	2,11
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,85	0,61	0,44
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,482	1,311	1,115
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,757	2,588	1,779
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,46	0,698	0,761	0,810

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	1,00	1,46	2,06
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,86	0,61	0,45
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,084	0,172	0,322
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,757	2,588	1,779
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	61,6	58,1	55,7
Innendämmsystem:					** feuchteabhängig	
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5



1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

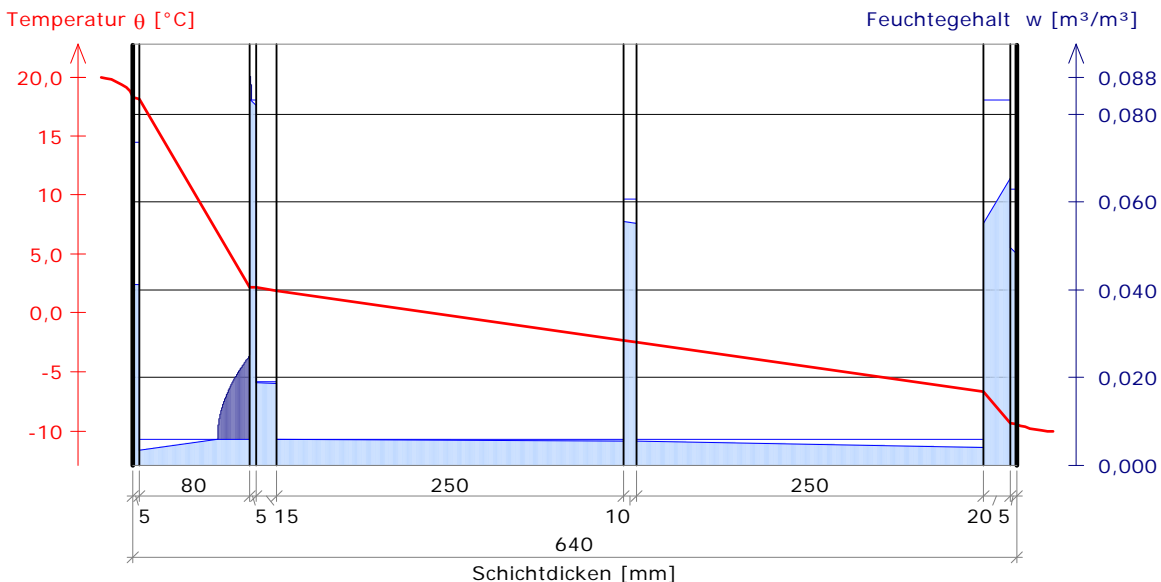
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

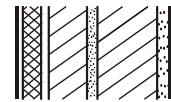
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,3	2097	1169	0,041		
				0,041		
2 Calciumsilikatplatte	18,2	2086	1163	0,003		
3 Klebemörtel (Klimaplatte)	2,2	717	717	0,025	24,2	0,31
				0,088	1,3	0,00
4 Kalkputz (historisch)	2,1	713	703	0,082		
5 Altbauziegel	1,9	701	684	0,019		
				0,019		
6 Lehmörtel (historisch)	-2,3	505	463	0,006		
7 Altbauziegel	-2,5	497	452	0,005		
				0,005		
8 Trasskalk-Mineraldämmputz	-6,7	347	231	0,004		
9 Kalkzementputz	-9,4	275	216	0,055		
				0,065		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	273	208	0,049		
	-10	260	208	0,048		



1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

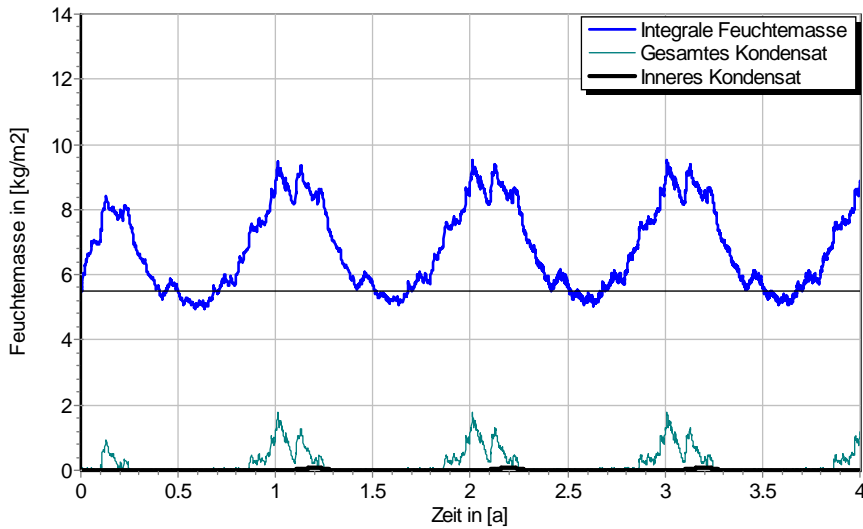


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

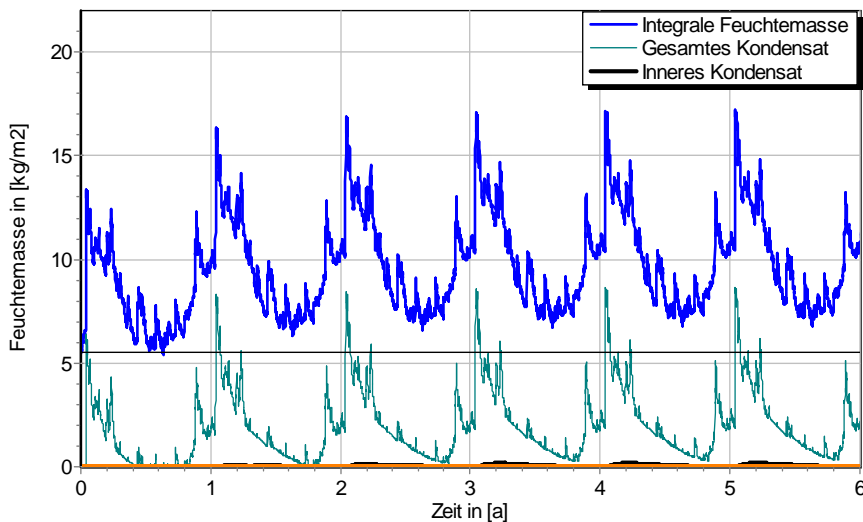


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

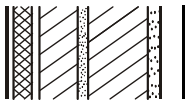
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,73	2,57	3,36	3,98
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,02	0,03	0,08



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante (2 SL) in orange

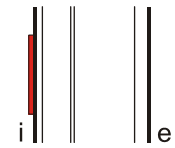
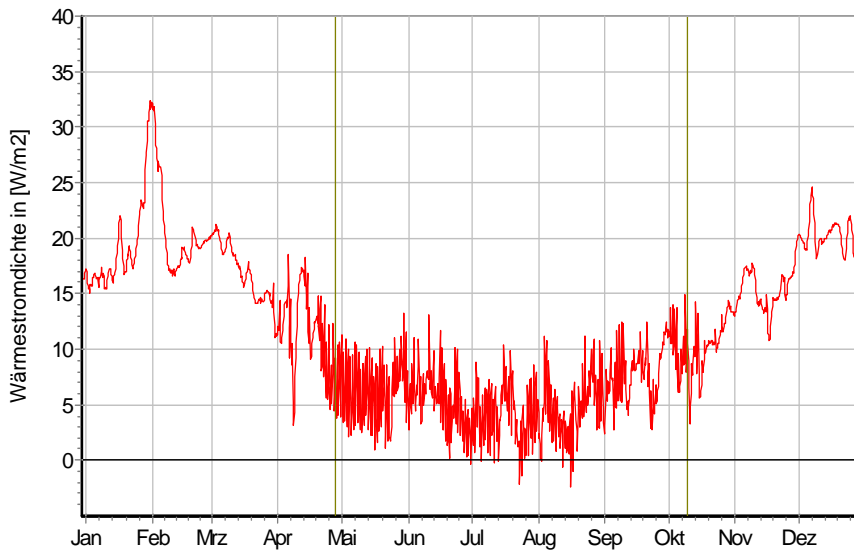
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,70	9,21	10,20	11,71
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,14	0,24*	0,06*	0,22*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

5.2 Instationäre Wärmeverluste

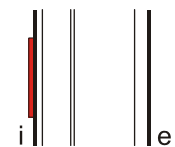
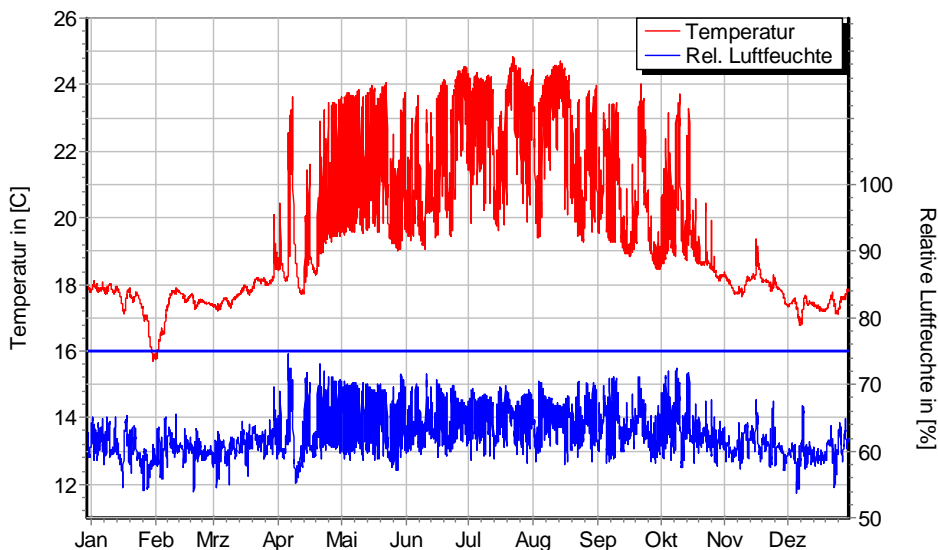


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,9	16,42	11,58	8,33
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	0,93	0,66	0,47
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,90	1,35	1,94

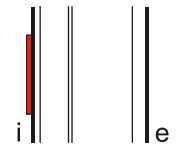
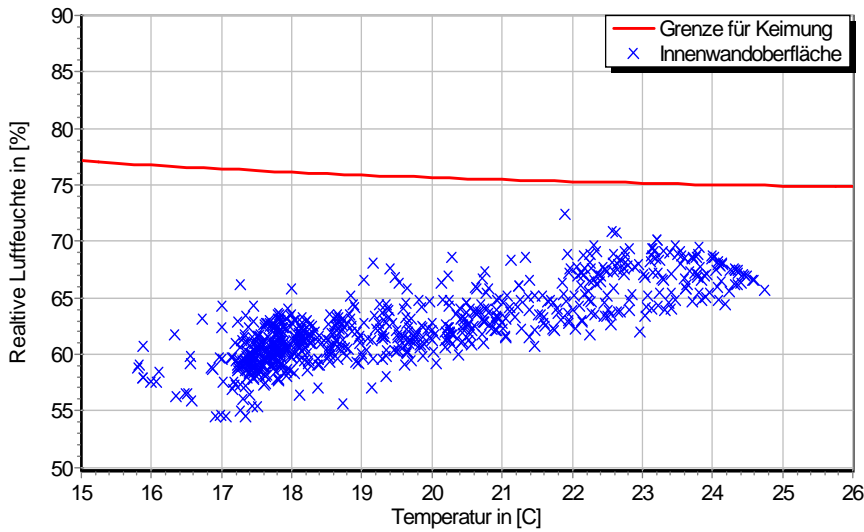
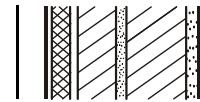
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	16,59	11,59	8,31
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	0,94	0,66	0,47
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,89	1,35	1,95

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

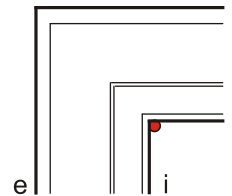
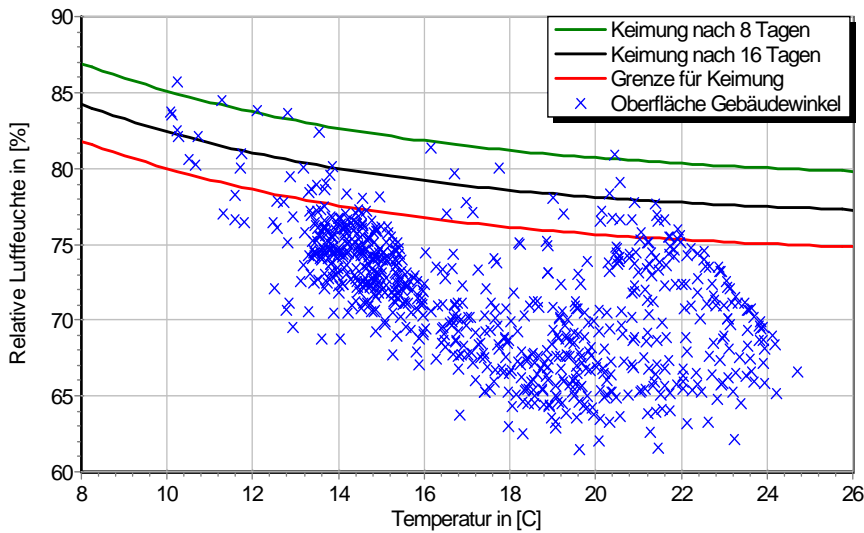


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat

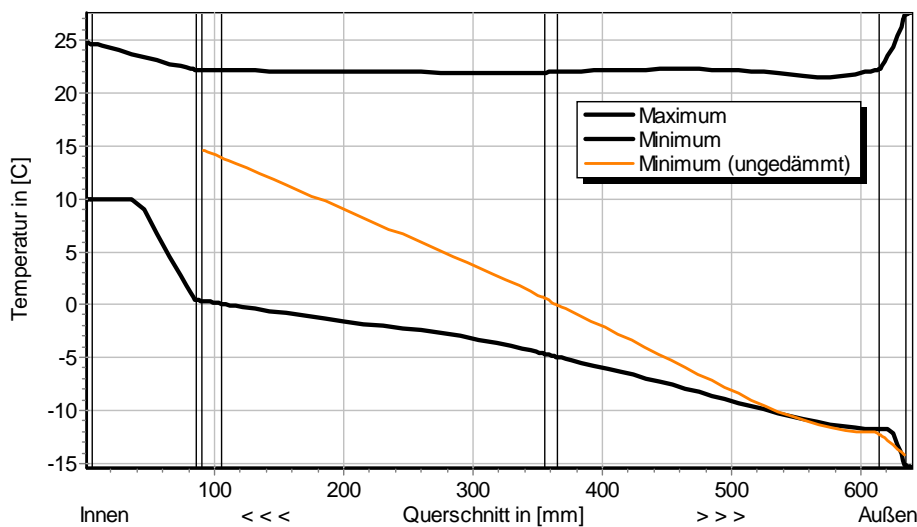


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

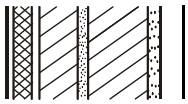


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

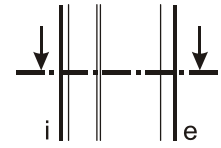
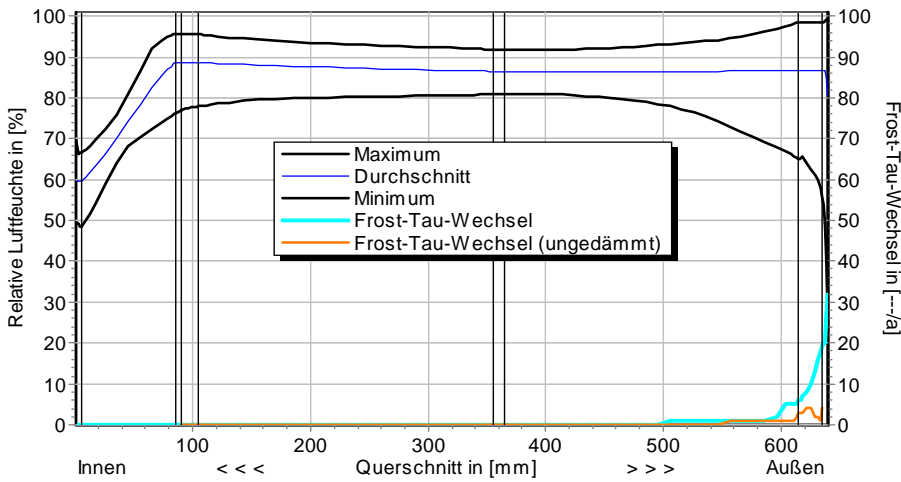
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



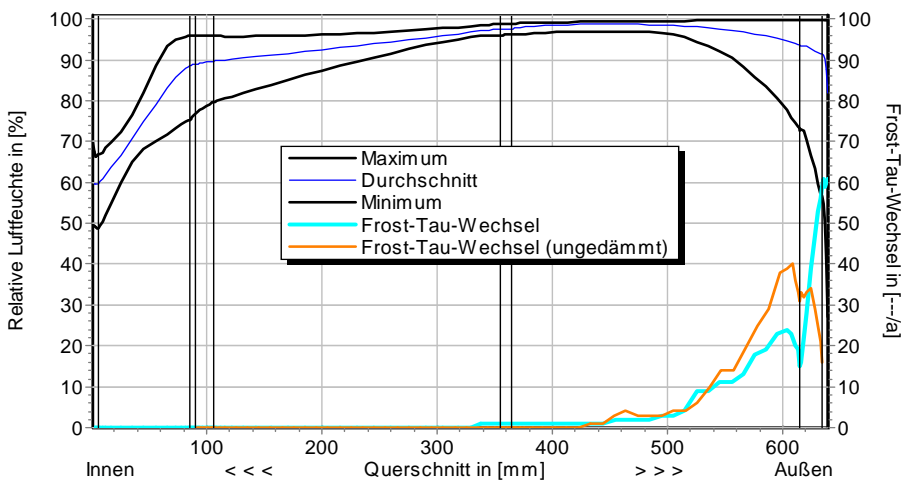
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

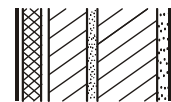


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	14	23	29
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	107,5	107,6	108,0
	WL_w	%	100	117,4	116,0	120,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	93,4	93,9	94,4
	CIL_φ	%	100	103,7	103,1	102,8
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	39	50	56
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	107,7	107,8	108,0
	WL_w	%	100	128,8	126,6	125,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	109,3	110,0	110,5
	CIL_φ	%	100	104,2	99,4	95,4

1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, bis einschließlich 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.

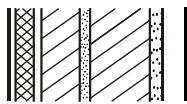
COND: Die Varianten mit 50 (1½ SL) und 80 mm (2 SL) Dämmung erfüllen die DIN-Kriterien bezüglich Mindestwärmeschutz. Die maximale Kondensatmenge und Verdunstung werden immer eingehalten.

Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Ohne und mit Schlagregeneinfluss werden bei jeder Dämmvariante die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

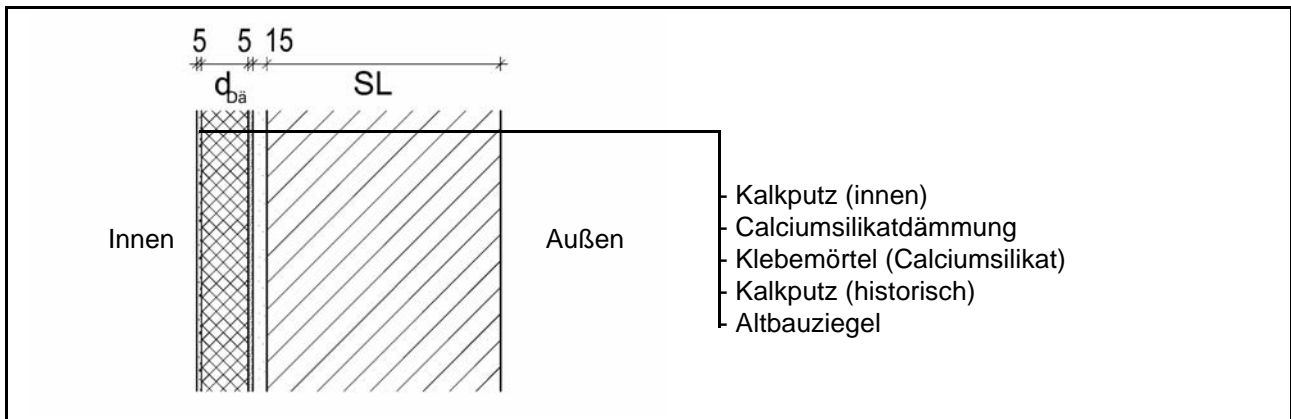
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz verputzt: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

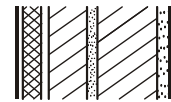
	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	0,80	1,28	1,90
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	1,03	0,69	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,513	1,803	1,353
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,777	2,598	1,784
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,662	0,741	0,838

* mit $R_{si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	0,78	1,24	1,85
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	1,05	0,71	0,50
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,173	0,263	0,412
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,777	2,598	1,784
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	64,7	59,4	56,4
Innendämmsystem: ** feuchteabhängig						
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,7	26,9	15,5

1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat



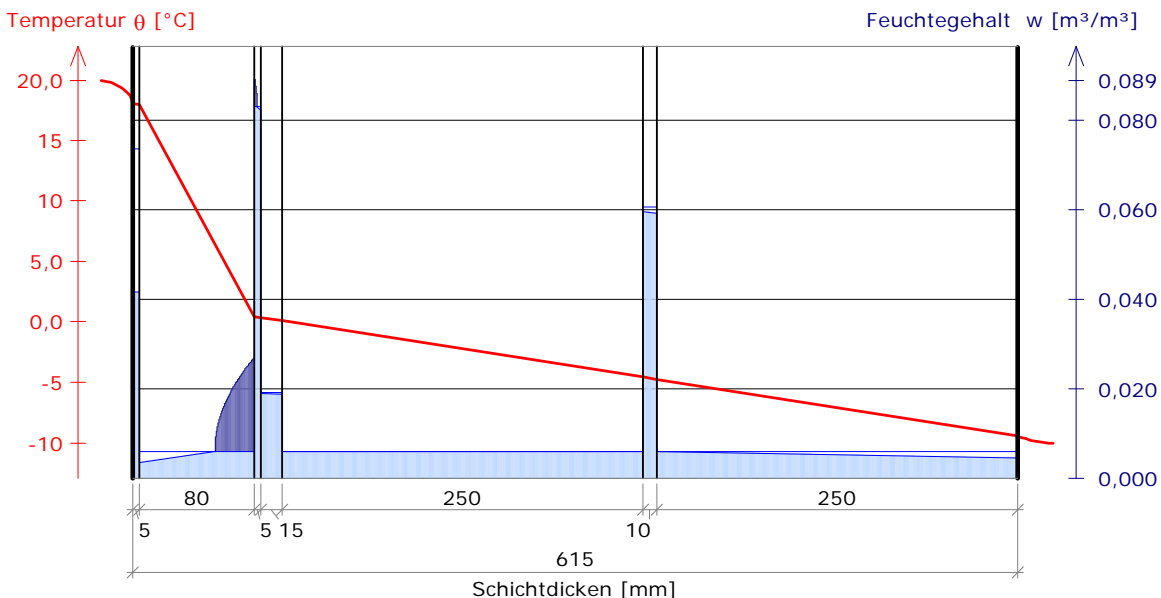
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

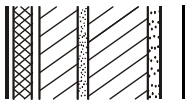
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ mit 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,1	2073	1169	0,042		
				0,042		
2 Calciumsilikatplatte	18,0	2060	1164	0,003		
3 Klebemörtel (Klimaplatte)	0,4	631	631	0,027	28,0	0,39
				0,089	1,8	0,01
4 Kalkputz (historisch)	0,4	628	621	0,082		
				0,019		
5 Altbauziegel	0,1	616	604	0,019		
				0,006		
6 Lehmörtel (hist.)	-4,5	418	411	0,006		
				0,060		
7 Altbauziegel	-4,8	410	401	0,059		
				0,006		
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	274	208	0,005		
	-10	260	208			





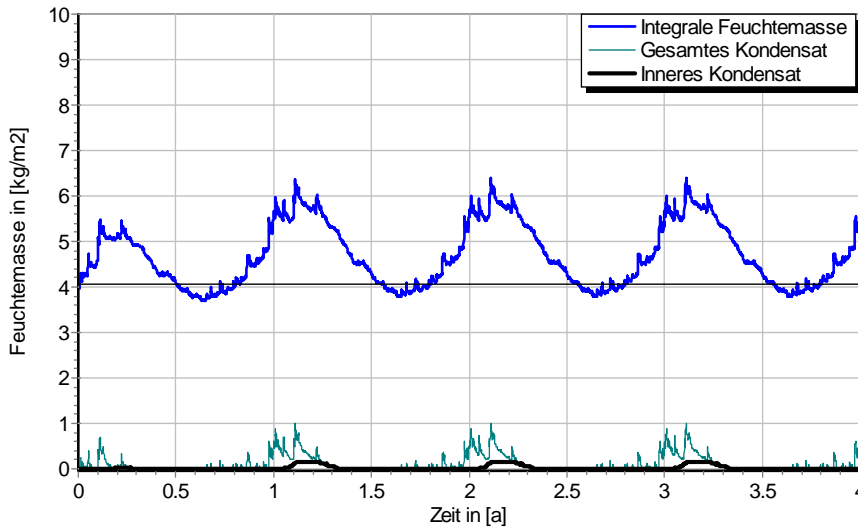
1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

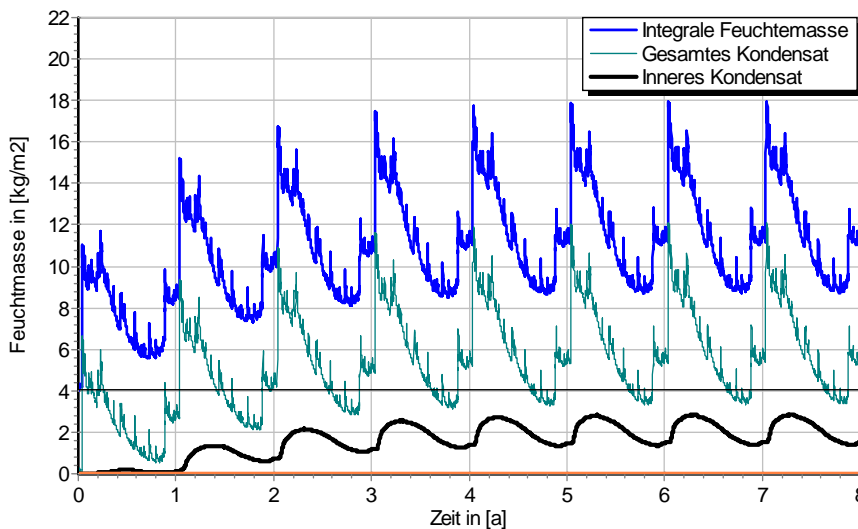


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	1,280	1,817	2,331
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0	0,207	0,157	0,167

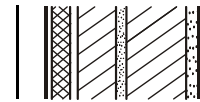


Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der un sanierten Variante (2 SL) in orange

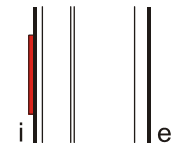
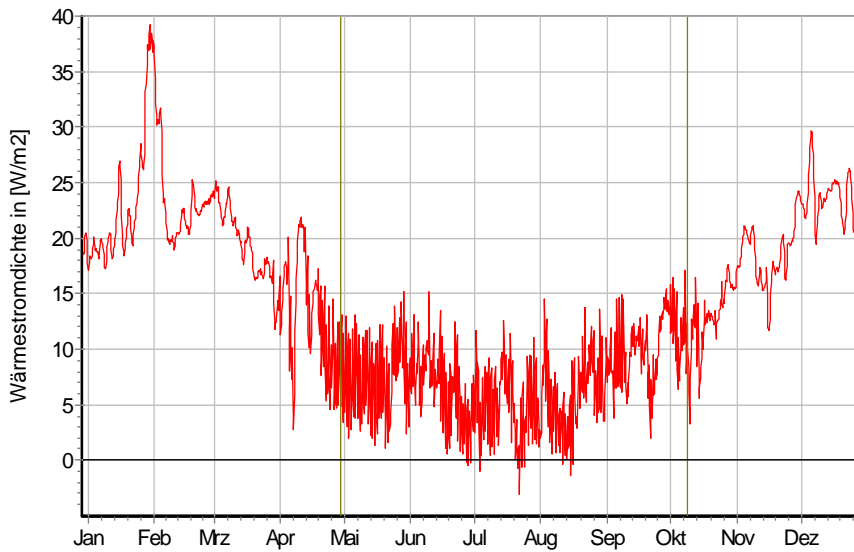
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	8,315	10,384	13,867
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	1,577*	0,822*	2,863*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

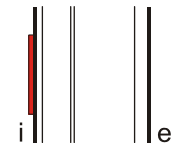
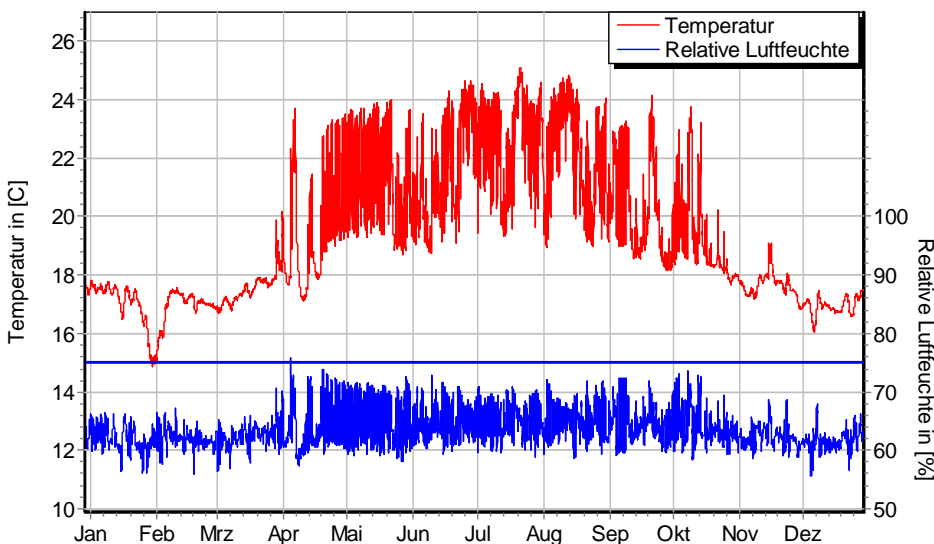


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

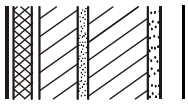
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	19,25	12,85	8,94
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,53	1,09	0,73	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	0,74	1,20	1,80

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	19,11	12,75	8,92
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,52	1,09	0,73	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	0,75	1,21	1,80

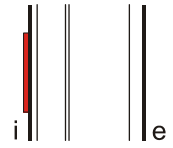
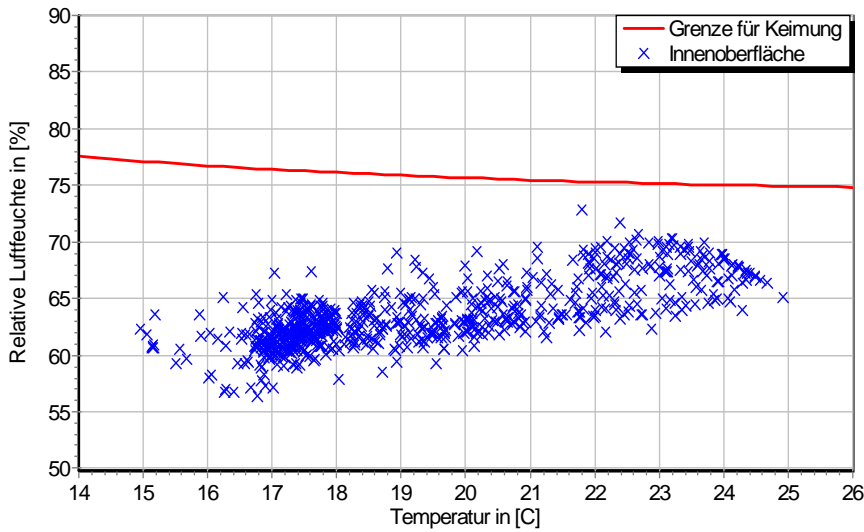
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



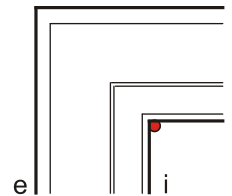
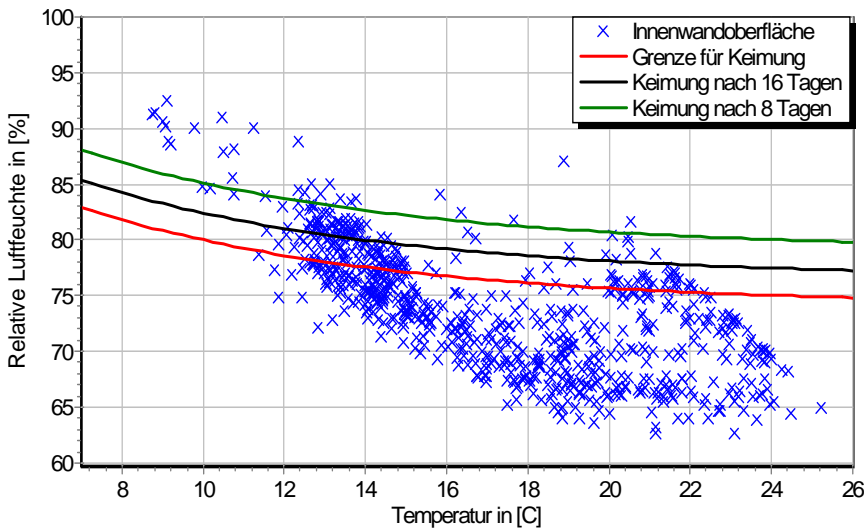
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat

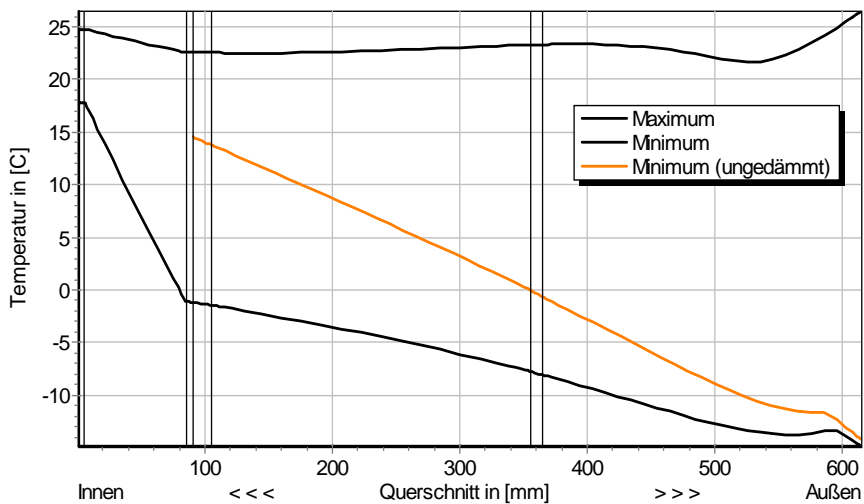


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



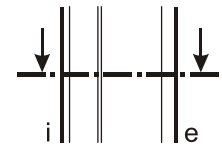
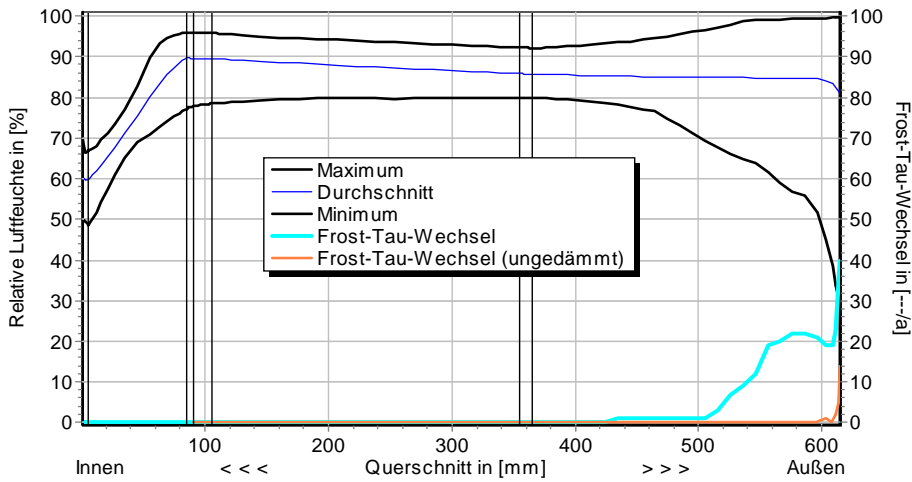
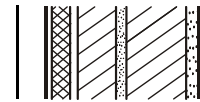
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

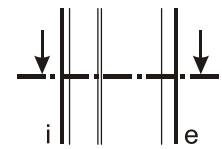
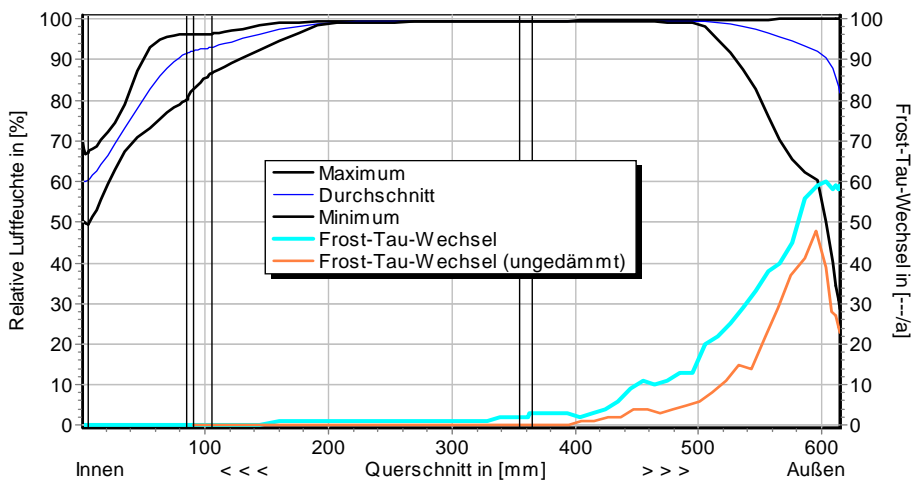


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat



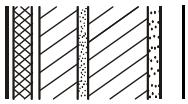
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	22	33	40
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,0	95,3	95,7
	WL_w	%	100	100,5	118,9	122,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,6	96,9	97,6
	CIL_φ	%	100	95,9	95,3	94,5
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	48	60	66
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,0	96,8	97,1
	WL_w	%	100	113,2	115,3	112,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,1	96,0	97,2
	CIL_φ	%	100	100,1	98,6	96,6



1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✓	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

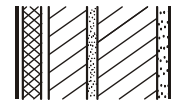
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, bis einschließlich 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- COND: Bis 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten, ab 50 mm Dämmung (1½ SL) werden alle DIN-Kriterien erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gerade noch erfüllt. Ohne Schlagregeneinfluss werden bei jeder Dämmvariante die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung eingehalten, mit Schlagregeneinwirkung uneinheitliche Ergebnisse. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm (2 SL) Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

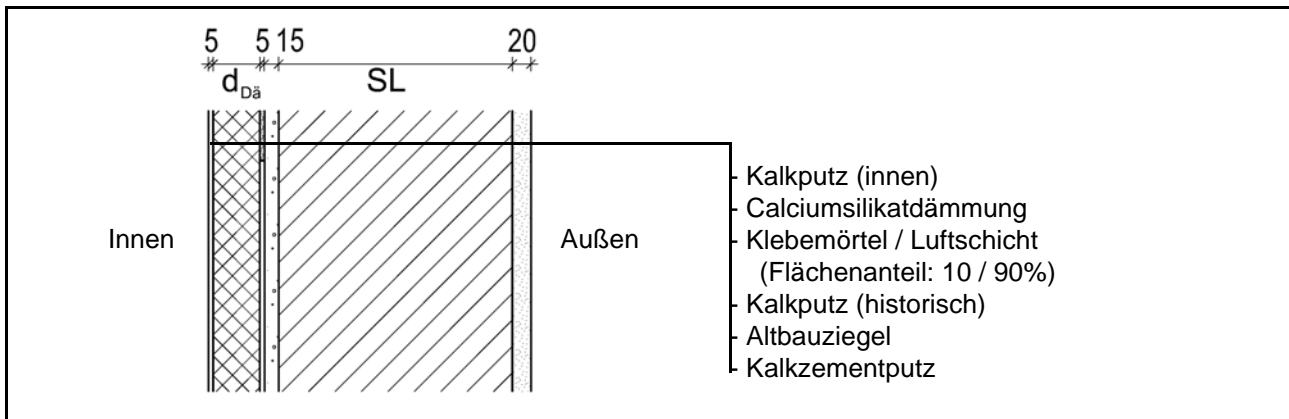
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3

1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht und Steinlänge (SL): $d_{D\ddot{a}} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebmörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

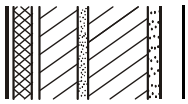
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	0,92	1,40	2,02
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,92	0,64	0,45
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,662	1,871	1,375
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,690	2,627	1,869
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,666	0,743	0,799

* mit $R_{si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	0,92	1,39	2,01
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,92	0,65	0,46
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,153	1,480	1,046
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,690	2,627	1,869
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	62,6	58,5	55,9
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,20	0,27	0,39
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,57	0,88	1,34
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	25,0	13,6



1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt

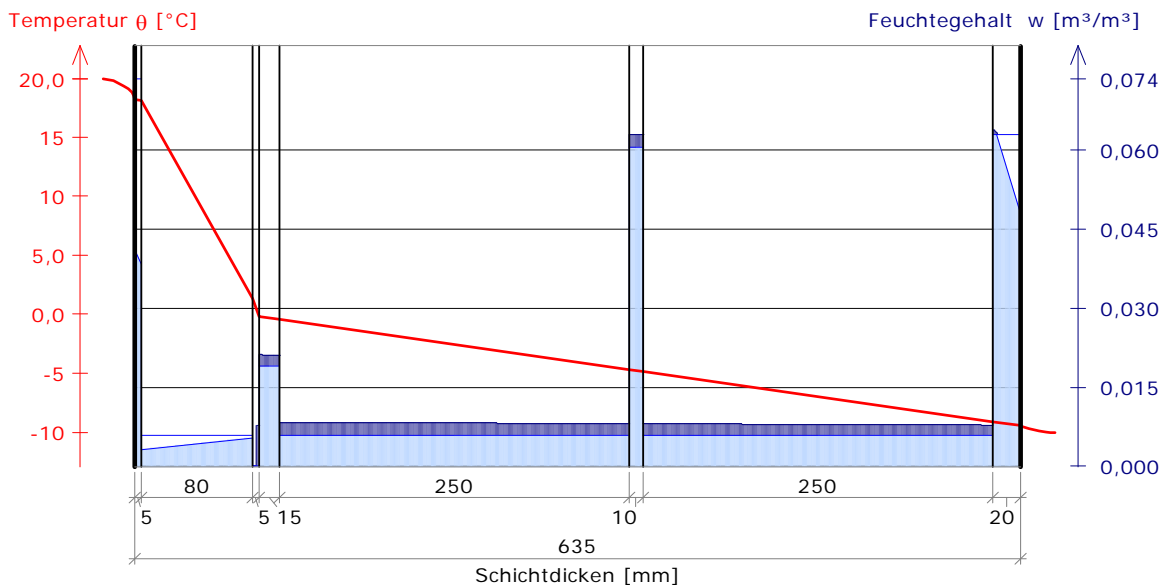
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniert, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

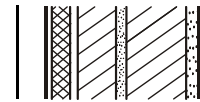
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, Schnitt durch Luftschicht

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,2	2094	1169	0,041		
	2 Calciumsilikatplatte	18,1	2082	1085	0,038	
3 Luftschicht 5 mm (vertikal)		1,3	672	609	0,003	
	0,005					
4 Kalkputz (historisch)	-0,2	603	603	0,000	0,0	0,00
				0,008	15,0	0,03
5 Altbauziegel	-0,4	591	591	0,021		
				0,008	250,0	0,56
6 Lehmörtel (historisch)	-4,7	413	413	0,063		
				0,008	10,0	0,02
7 Altbauziegel	-4,9	406	406	0,063		
				0,008	250,0	0,50
8 Kalkzementputz	-9,1	281	281	0,008		
				0,064	3,2	0,00
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	273	208	0,048		
	-10	260	208			



1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt

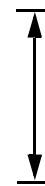
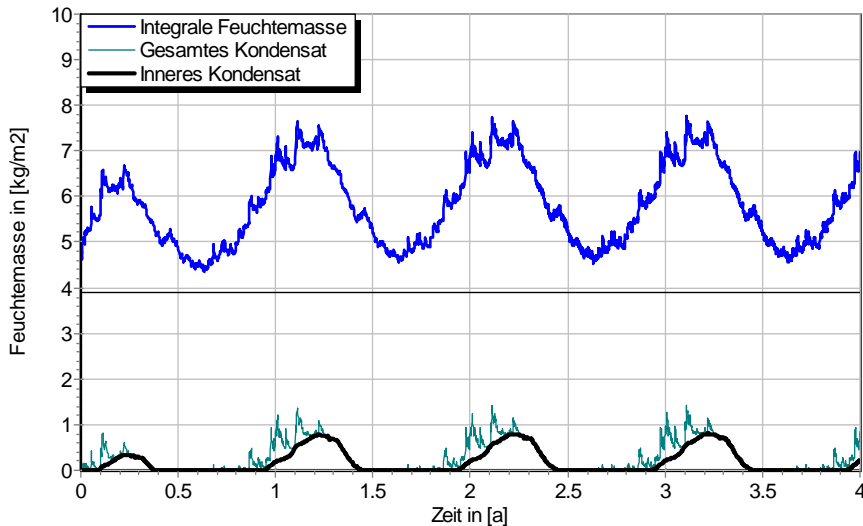


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



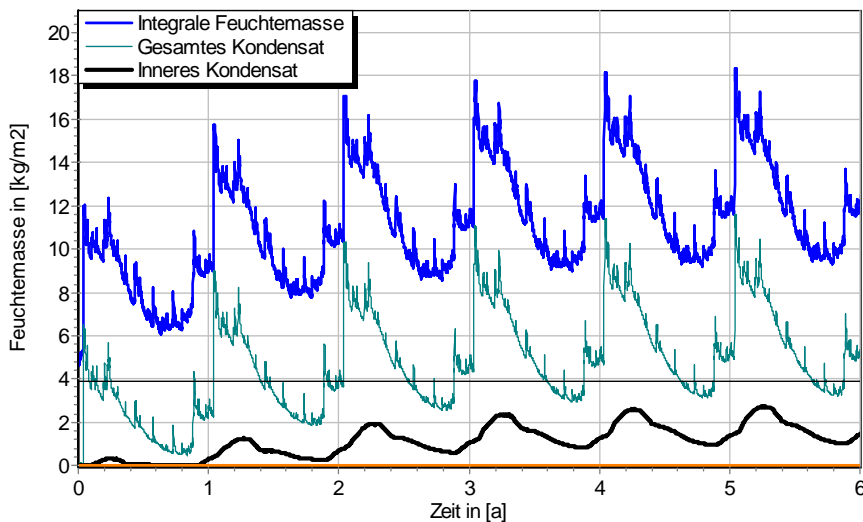
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	3,095	2,821	7,761
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	1,703	1,052	0,802

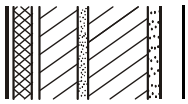


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante (2 SL) in orange

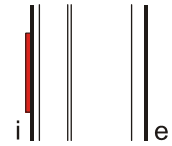
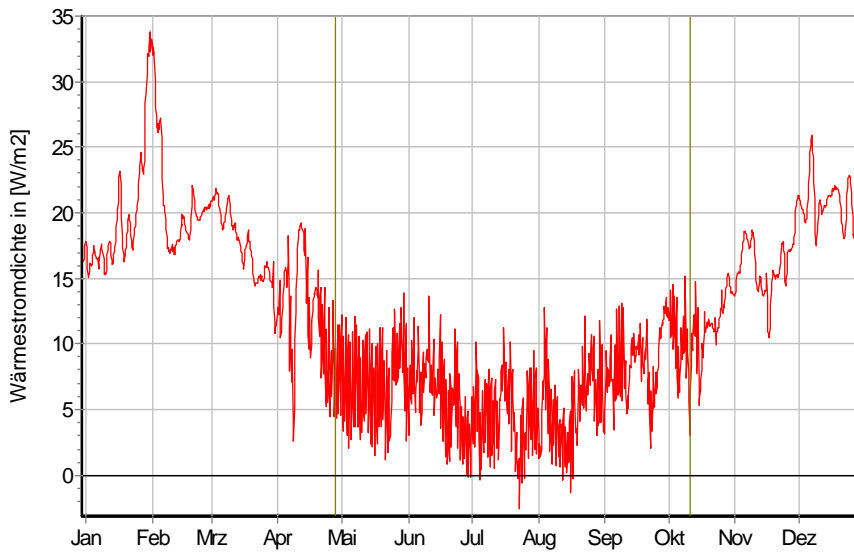
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	9,426	11,313	13,803
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	3,064*	1,616*	2,847*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt

5.2 Instationäre Wärmeverluste

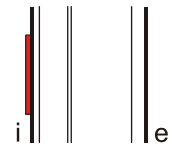
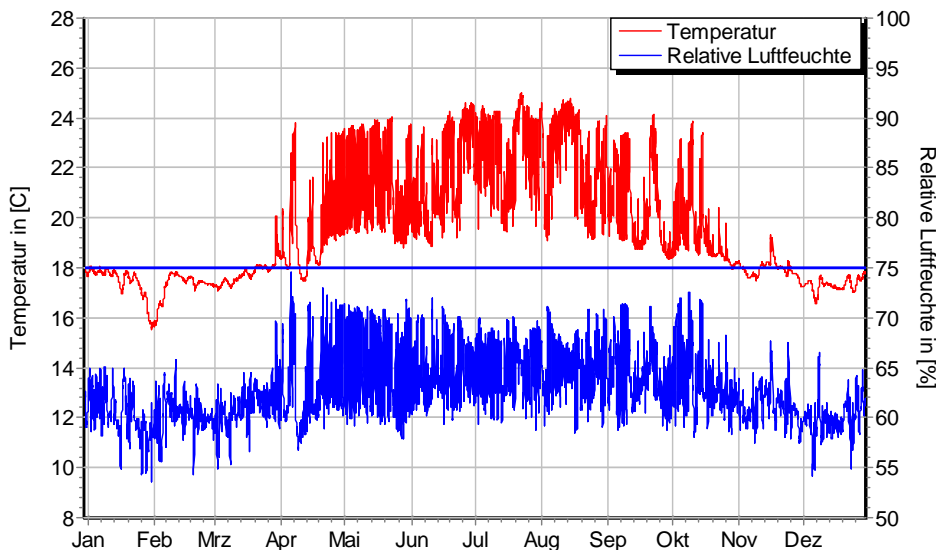


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,9	16,97	11,74	8,36
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	0,83	0,60	0,44
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	1,04	1,50	2,10

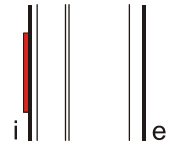
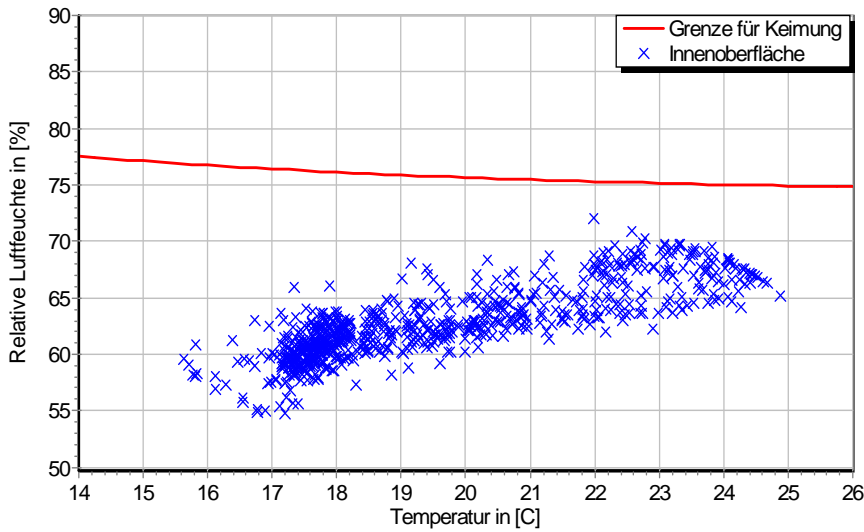
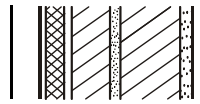
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	16,74	11,61	8,28
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	0,82	0,59	0,43
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	1,05	1,51	2,13

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

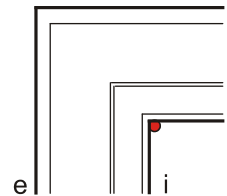
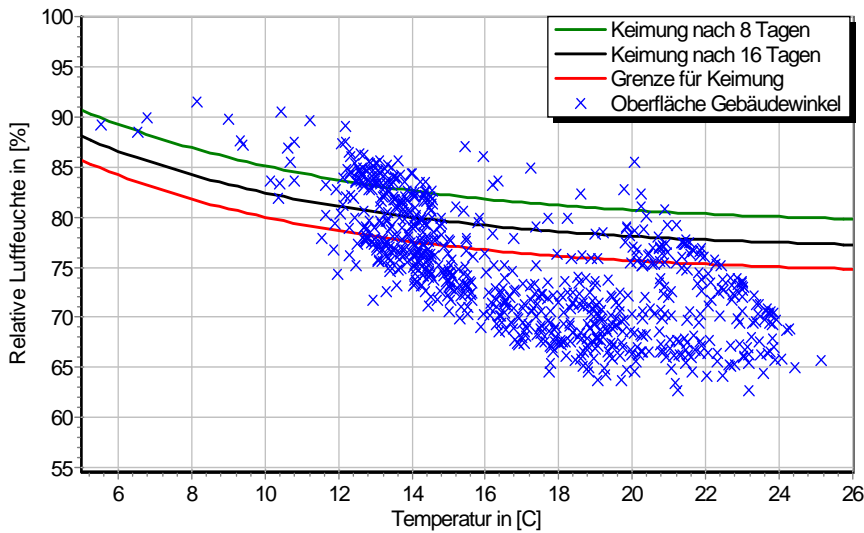


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt

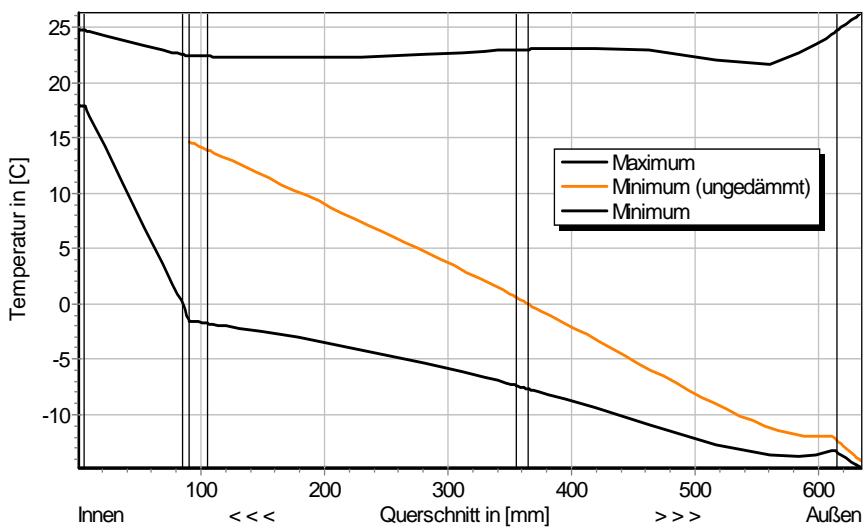


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

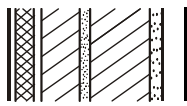


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

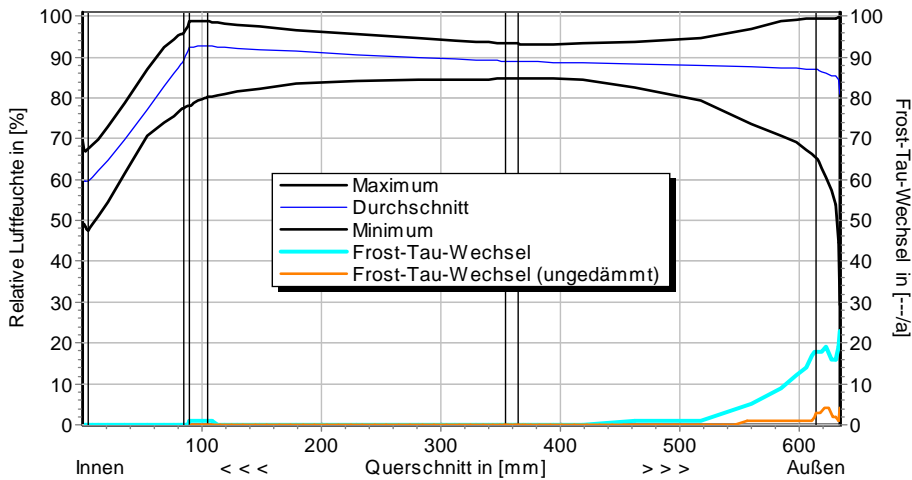
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



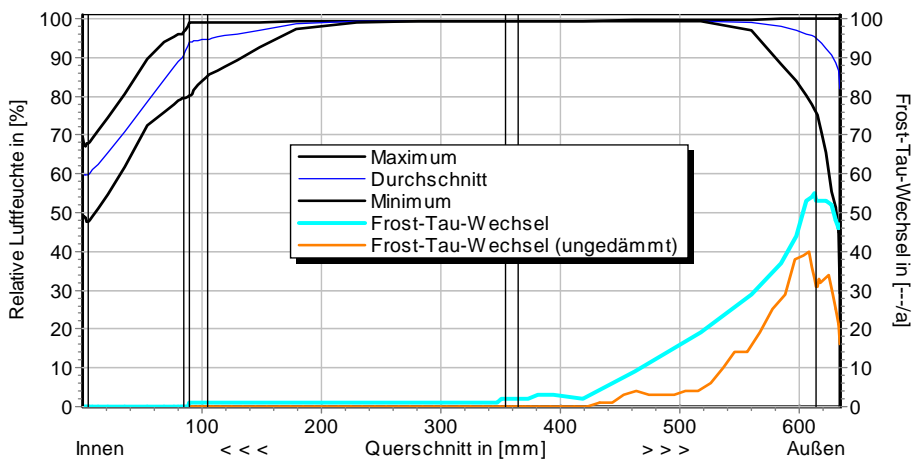
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsili- kat, punktuell verklebt



Luftfeuchteprofile und
Frost-Tau-Wechsel für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
ohne Schlagregen
(Nord)

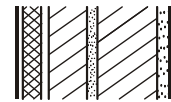


Luftfeuchteprofile und
Frost-Tau-Wechsel für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
schlagregenexponiert
(West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	14	22	30
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,4	97,7	98,2
	WL_w	%	100	92,0	85,0	84,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	103,6	100,8	100,5
	CIL_φ	%	100	99,5	97,6	95,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	42	52	58
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,3	98,1	98,3
	WL_w	%	100	106,8	105,2	104,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,8	97,5	98,2
	CIL_φ	%	100	110,1	106,5	104

1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

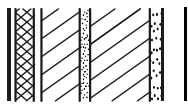
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Mit 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, bei allen Varianten zu hohe Kondensatmengen.
- COND: Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, bei allen Varianten zu hohe Kondensatmengen.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm Dämmung (1½ SL) gegeben. Ohne Schlagregeneinfluss bilden sich mit 30 und 50 mm Dämmung zu hohe Kondensatmengen. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung des Kondensats ist, ausgenommen mit 30 mm Dämmung, nicht mehr gewährleistet. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 80 mm Dämmdicke (2 SL, Schlagregensicherheit überprüfen).

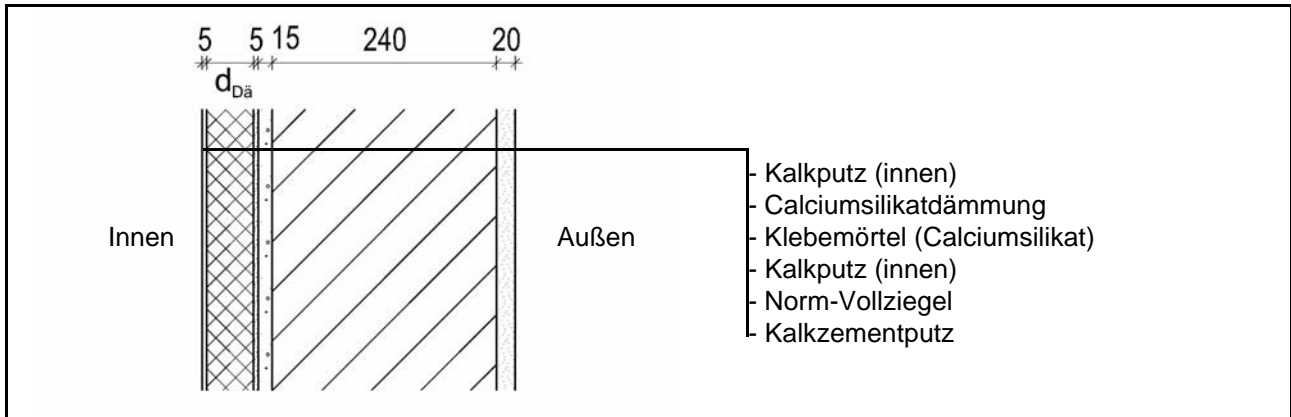
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50, 80$ mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Norm-Vollziegel	1400	0,550	18,8	1,1	31,9	0,156
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

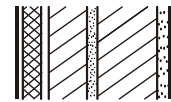
	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,48	0,95	1,26	1,72
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,54	0,89	0,70	0,53
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,860	1,881	1,605
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,545	1,772
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,533	0,692	0,742	0,788

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,48	0,93	1,22	1,66
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,54	0,91	0,72	0,55
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,300	0,369	0,639
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,545	1,772
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	73,0	62,4	59,6	57,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	39,7	31,1	26,4	15,7

1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



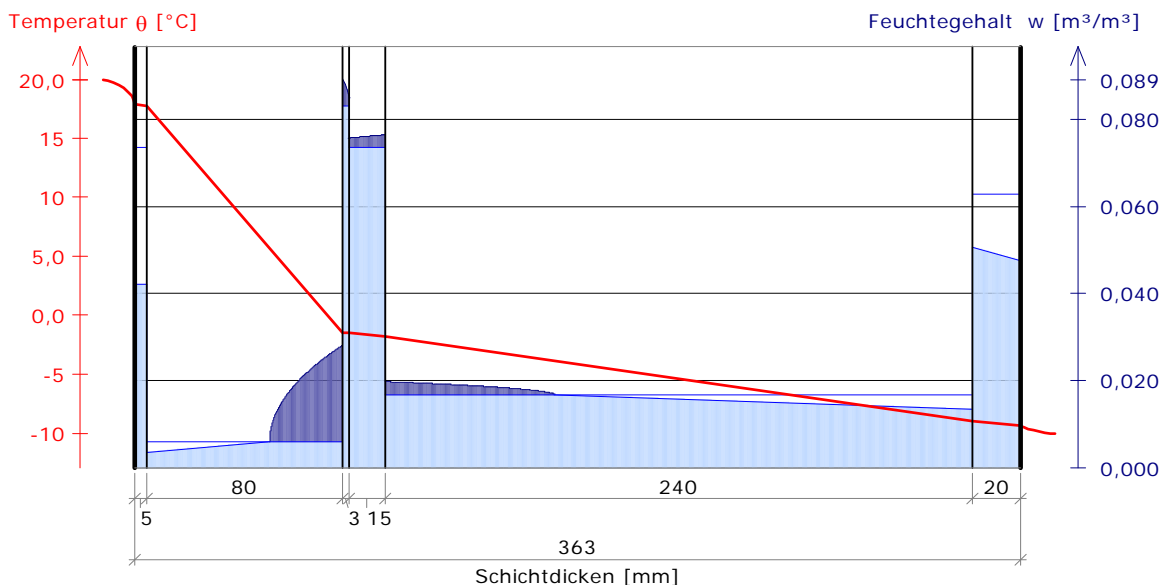
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

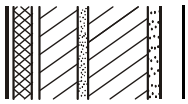
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,9	2047	1169	0,042		
				0,042		
2 Calciumsilikatplatte	17,8	2033	1165	0,003		
				0,028	30,1	0,45
3 Klebemörtel (Calciumsilikatplatte)	-1,5	542	542	0,089	3,0	0,01
				0,085		
4 Kalkputz (innen)	-1,5	540	540	0,076	15,0	0,04
				0,076		
5 Vollziegel	-1,8	526	526	0,020	69,2	0,14
				0,013		
6 Kalkzementputz	-8,9	286	229	0,051		
				0,048		
Luftschicht (Außenseite)	-9,3	275	208			
	-10	260	208			





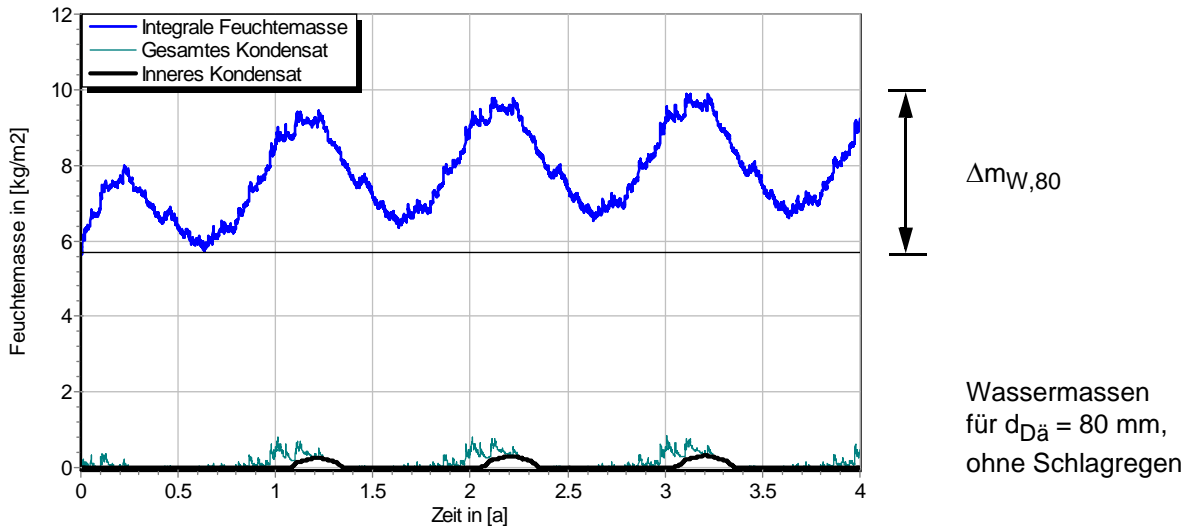
1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

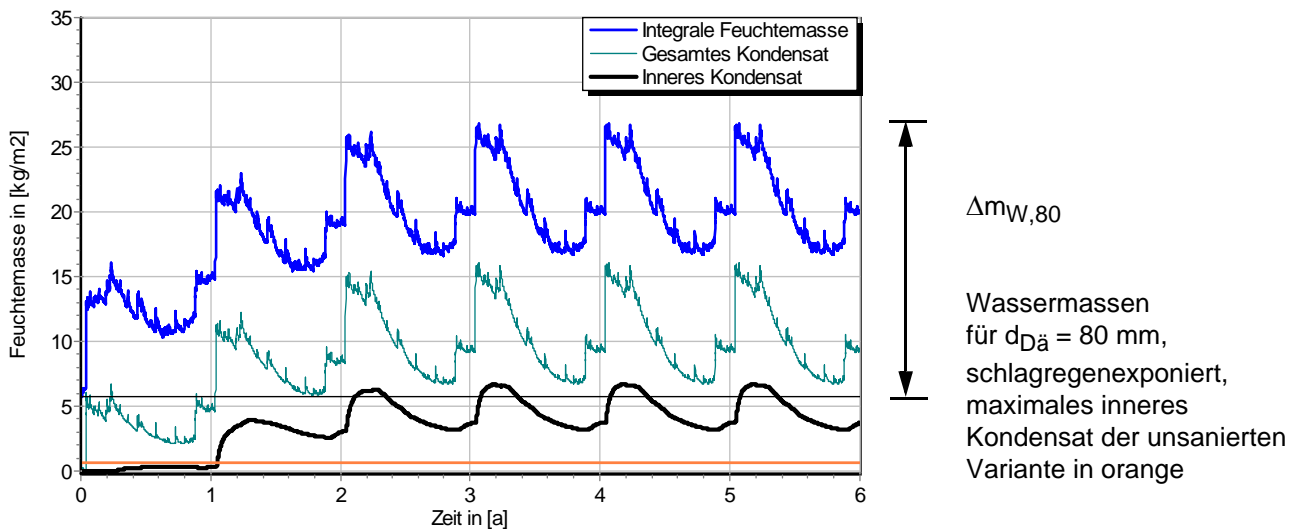
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



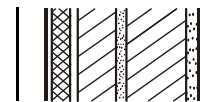
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	1,078	2,469	3,460	4,270
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,001	0,148	0,322



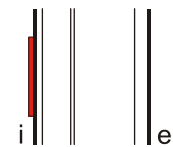
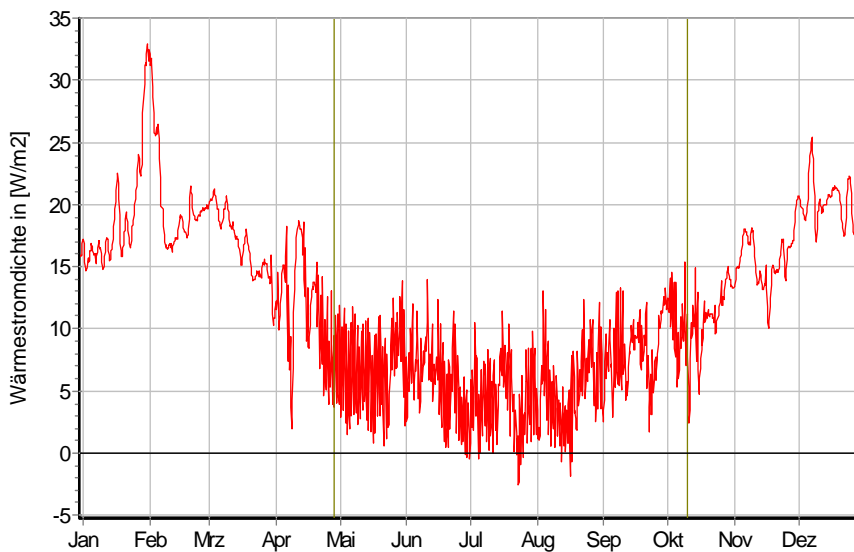
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	11,854	17,668	19,524	21,109
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,581	3,808*	5,095*	6,104*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

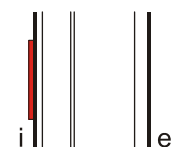
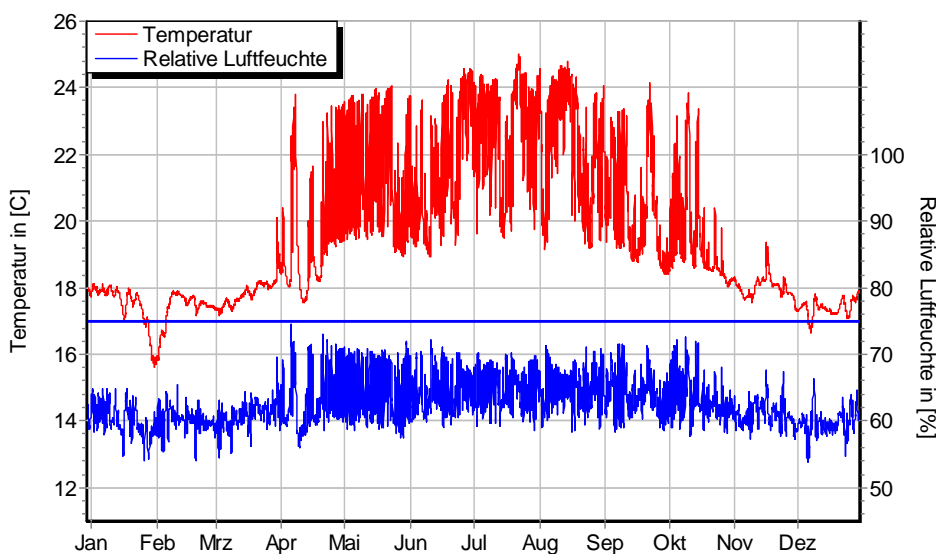


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

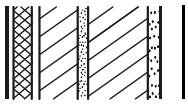
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	28,08	16,41	12,92	9,81
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,60	0,93	0,73	0,56
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,46	0,90	1,19	1,62

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	28,18	16,54	13,10	10,08
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,60	0,94	0,74	0,57
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,45	0,89	1,17	1,57

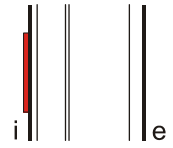
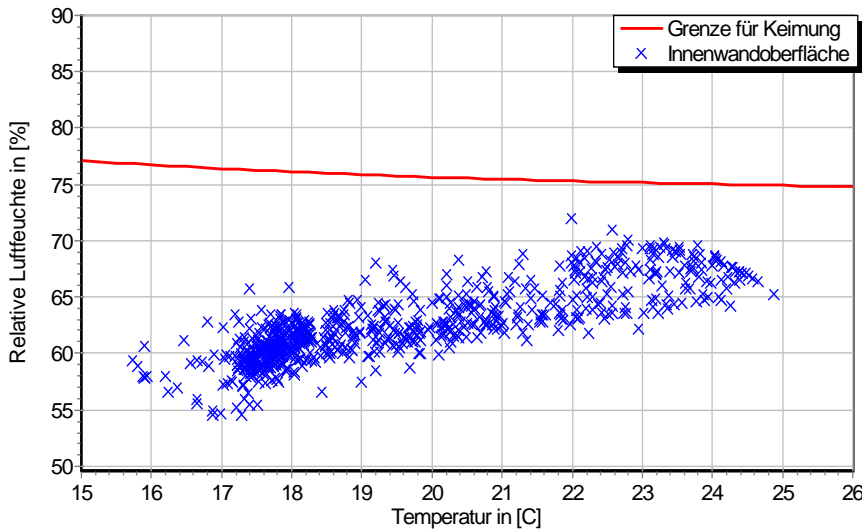
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



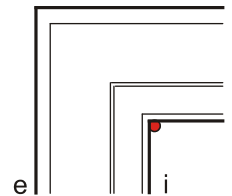
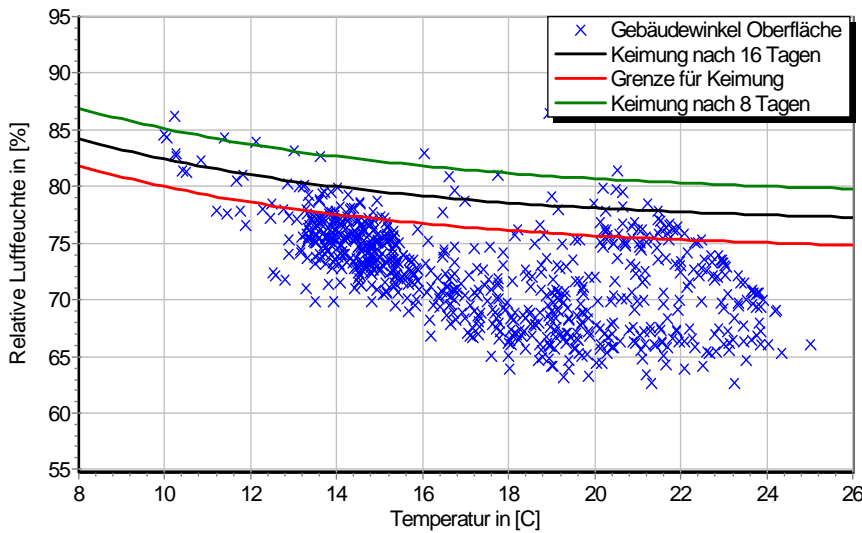
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

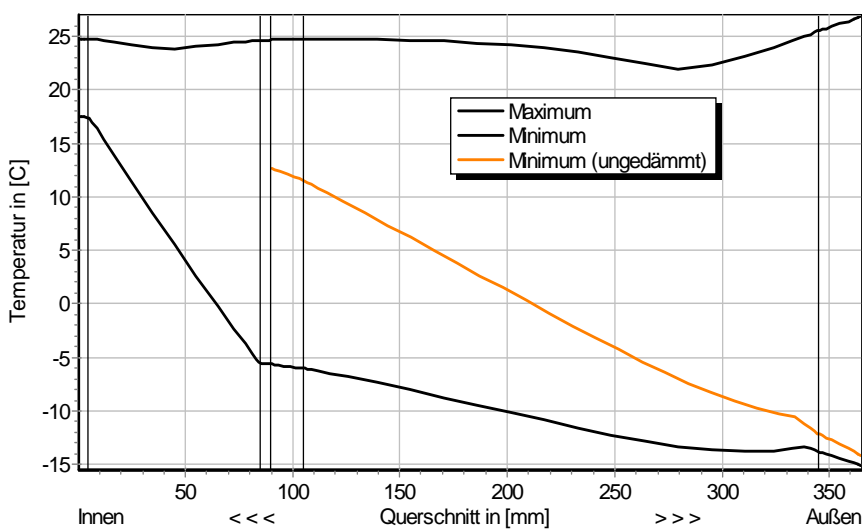


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



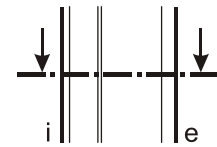
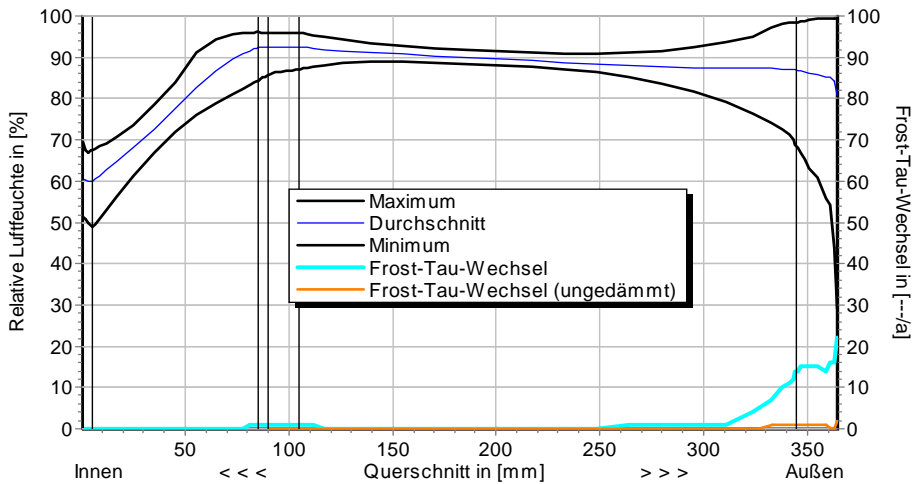
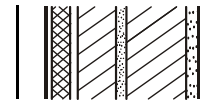
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

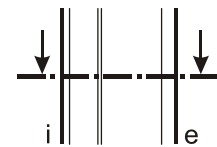
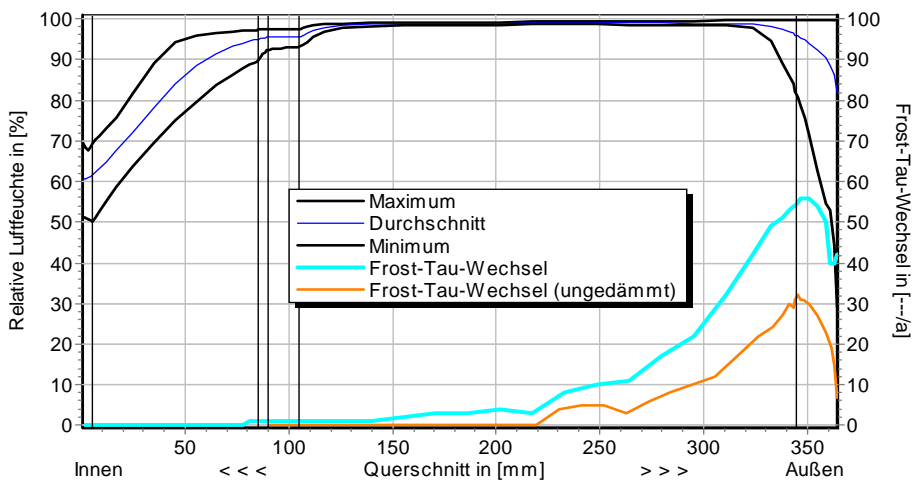


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



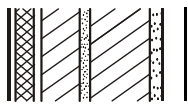
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	2	14	19	26	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,4	97,8	97,3	
	WL_w	%	100	92,8	89,7	85,3	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,2	97,9	97,9	
	CIL_φ	%	100	95,9	94,5	93,5	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	25	42	48	53	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,3	97,8	97,3	
	WL_w	%	100	104,5	105,9	107,1	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,0	96,2	95,5	
	CIL_φ	%	100	101,0	101,1	101,2	



1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

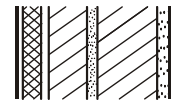
	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

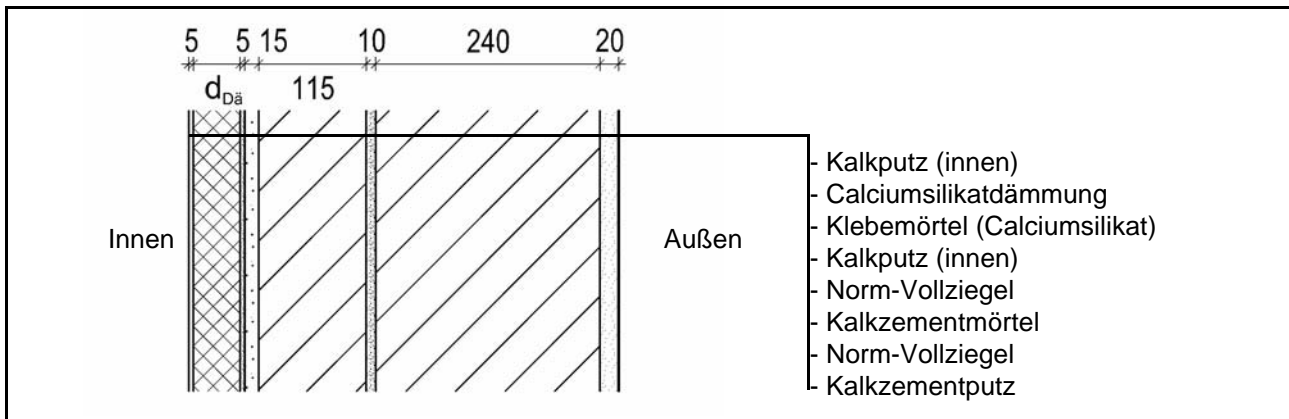
- DIN:** Bei allen Dämmdicken entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz ist erst ab 50 mm Dämmung gegeben.
- COND:** Bei allen Dämmdicken wird die maximale Kondensatmenge nicht erreicht, der Mindestwärmeschutz ist erst ab 50 mm Dämmung gegeben.
- Simulation:** Der Mindestwärmeschutz wird jeweils mit 50 mm Dämmung knapp unterschritten. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen, die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Schimmelpilzwachstum ist ab 50 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50, 80$ mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Norm-Vollziegel	1400	0,550	18,8	1,1	31,9	0,156
Kalkzementmörtel	1025	0,225	6,2	4,2	44,5	0,150
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

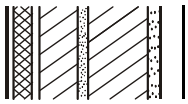
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,71	1,21	1,52	1,98
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,14	0,73	0,59	0,47
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,847	1,320	1,299
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,552	1,778
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,61	0,728	0,766	0,803

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,71	1,20	1,49	1,93
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,14	0,73	0,60	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,474	0,599	0,593
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,552	1,778
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,1	59,8	57,9	56,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	39,7	31,1	25,1	15,7



1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

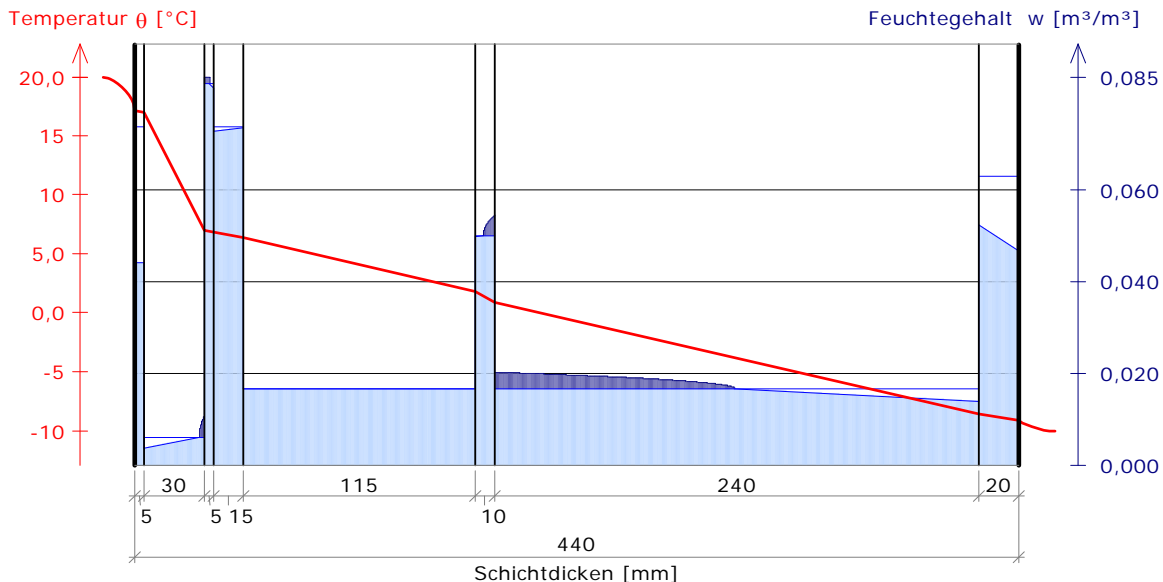
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

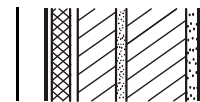
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,1	1957	1169	0,044		
				0,044		
2 Calciumsilikatplatte	17,0	1939	1162	0,004		
3 Klebemörtel (Calciumsilikatplatte)	7,0	1000	1000	0,011	3,2	0,01
				0,085	0,4	0,00
4 Kalkputz (innen)	6,8	992	981	0,082		
5 Vollziegel	6,4	963	961	0,073		
				0,073		
6 Kalkzementmörtel	6,4	963	961	0,017		
				0,017		
7 Vollziegel	1,8	697	695	0,050		
				0,055	6,3	0,02
8 Kalkzementputz	0,9	653	653	0,020	119,0	0,28
				0,014		
Luftschicht (Außenseite)	-8,6	295	245	0,052		
				0,047		
	-9,1	281	208			
	-10	260	208			



1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

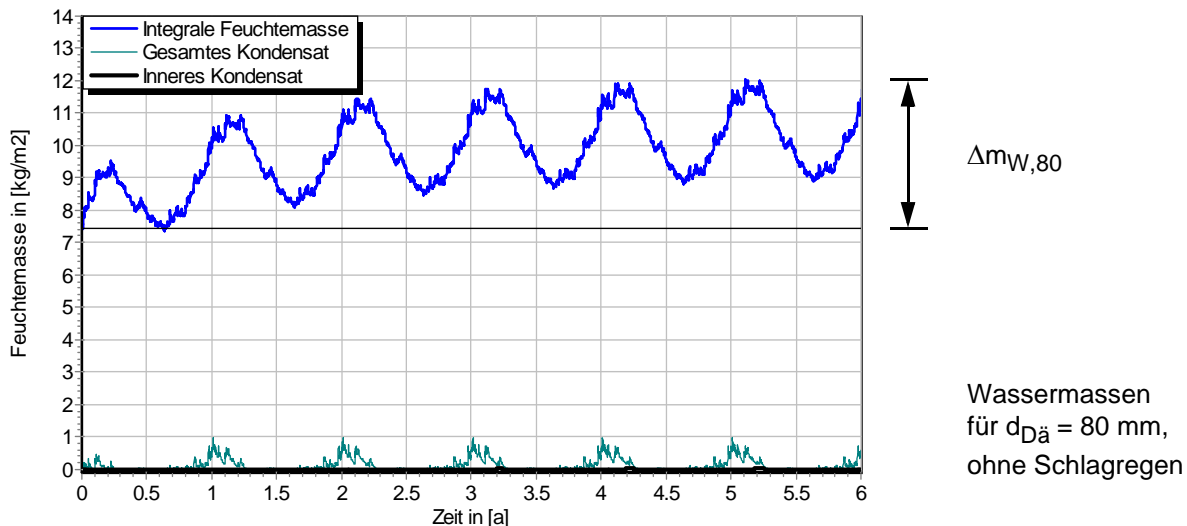


5 Simulationsergebnisse

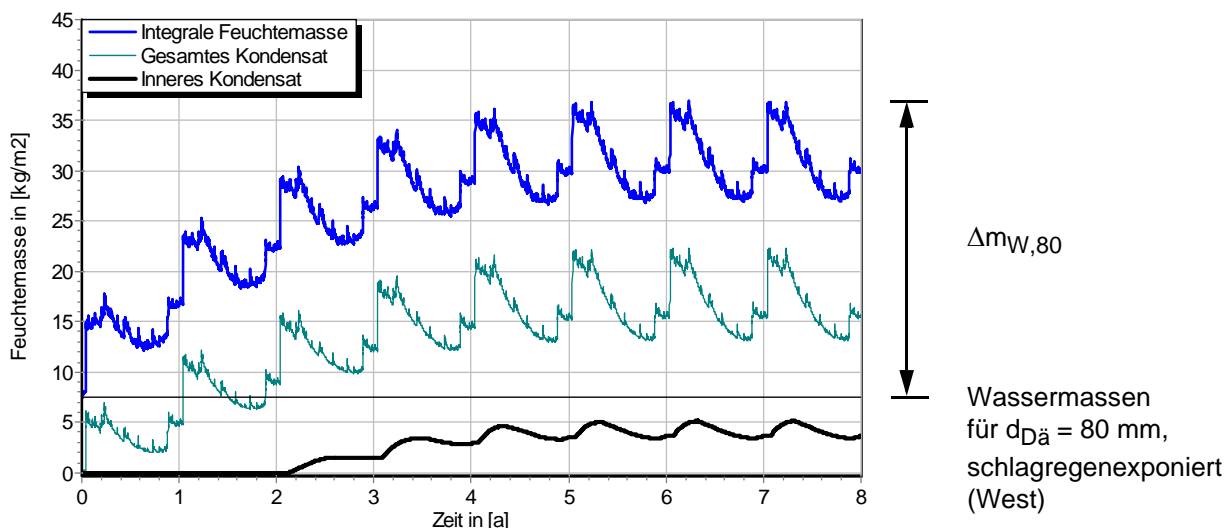
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



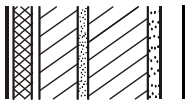
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	-0,225	1,990	3,344	4,772
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,043

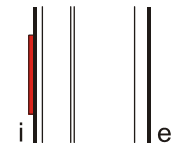
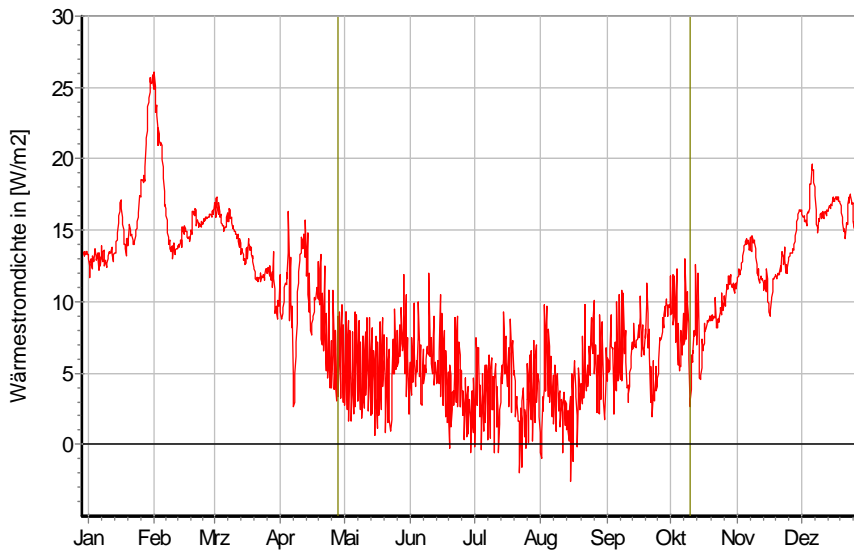


Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	17,242	24,709	27,236	29,410
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	2,774	4,028	5,136



1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5.2 Instationäre Wärmeverluste

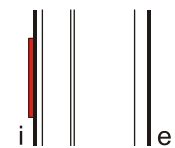
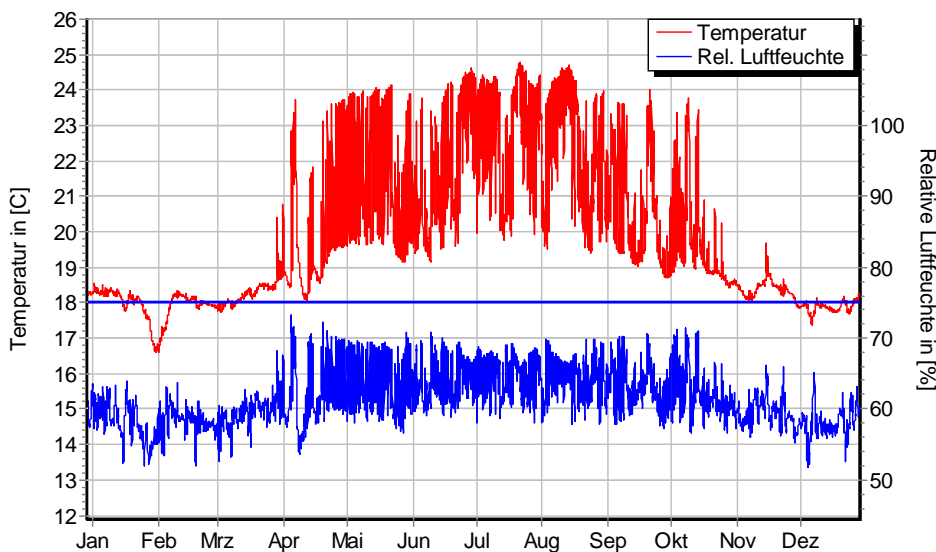


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	20,22	13,33	10,89	8,57
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,15	0,76	0,62	0,49
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,70	1,15	1,45	1,88

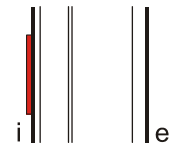
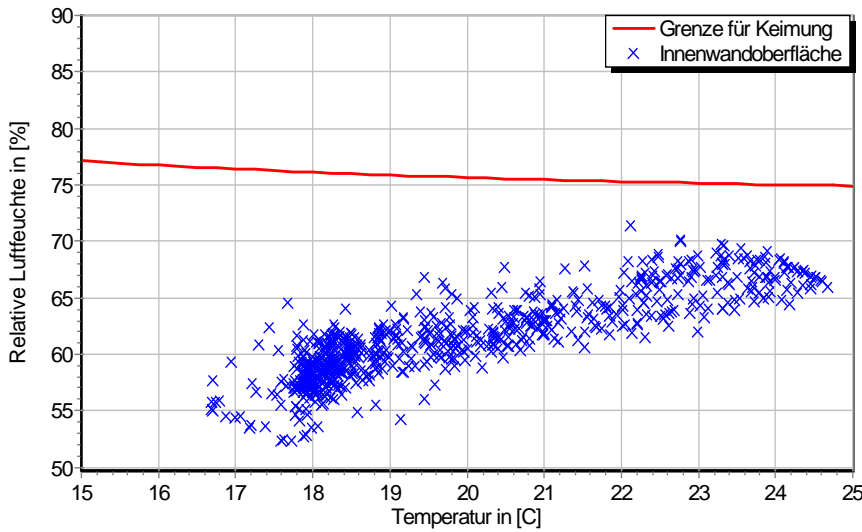
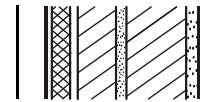
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	20,57	13,56	11,08	8,80
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,17	0,77	0,63	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,68	1,13	1,42	1,83

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

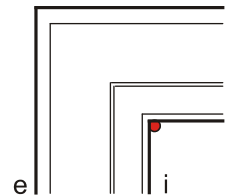
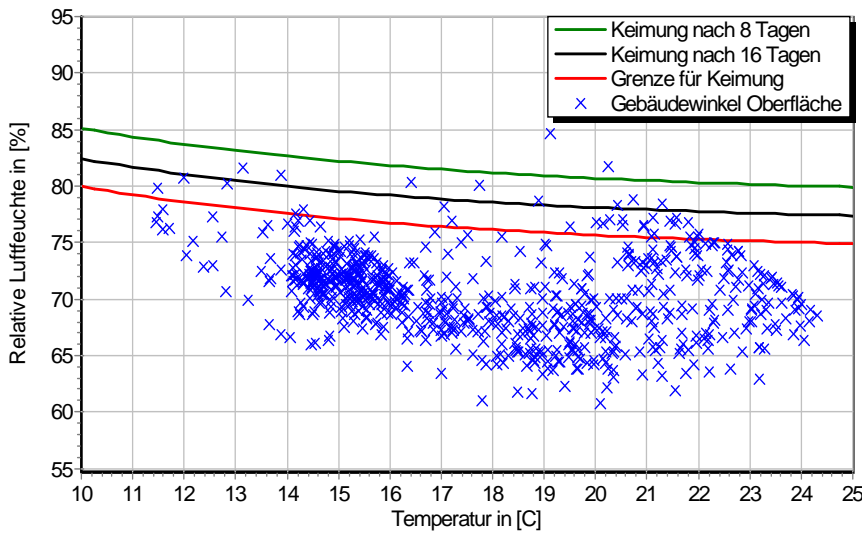


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

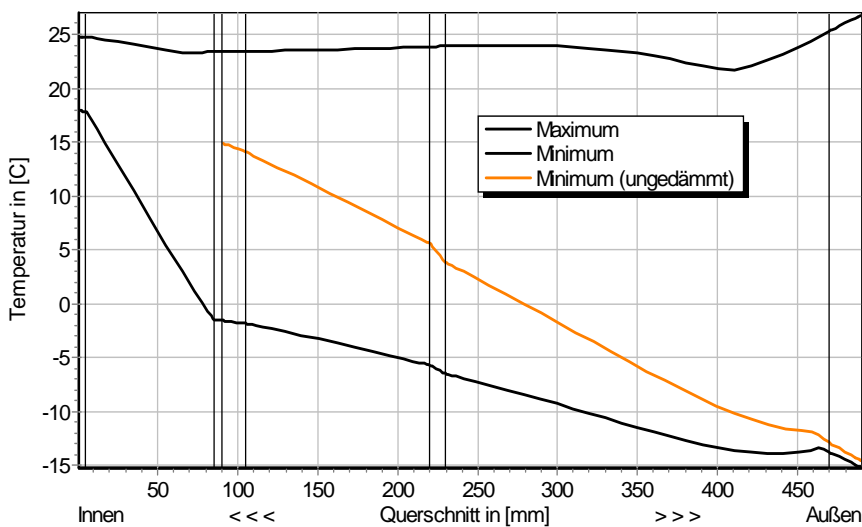


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

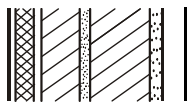


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

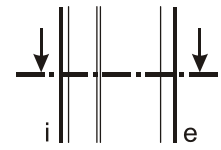
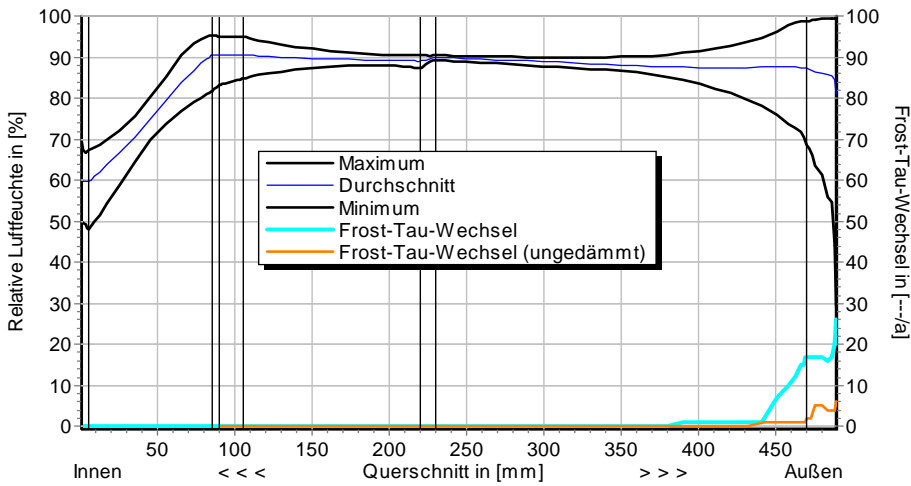
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



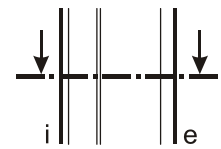
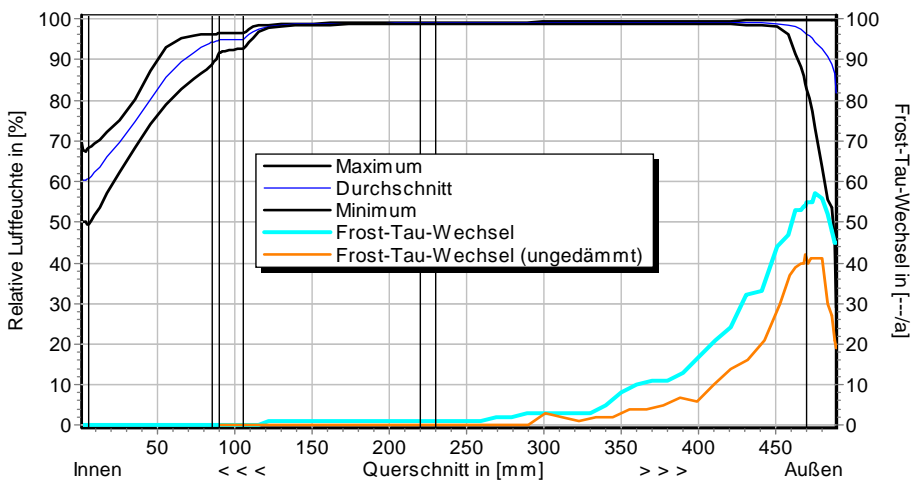
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

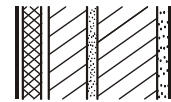


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	8	19	23	30
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,8	98,4	98,0
	WL_w	%	100	93,0	89,0	86,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	100,4	100,6	100,8
	CIL_φ	%	100	97,1	96,2	95,7
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	37	47	52	56
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	99,3	98,9	98,6
	WL_w	%	100	102,5	103,4	104,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,7	98,4	98,1
	CIL_φ	%	100	101,1	101,3	101,4

1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

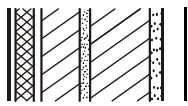
7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	✗	✓	✗	✗
COND	✗	✓	✓	✓
Simulation - ohne Schlagregen	✗	✗	✓	✓
Simulation - schlagregenexponiert	✗	✗	○	○

8 Schlussfolgerungen

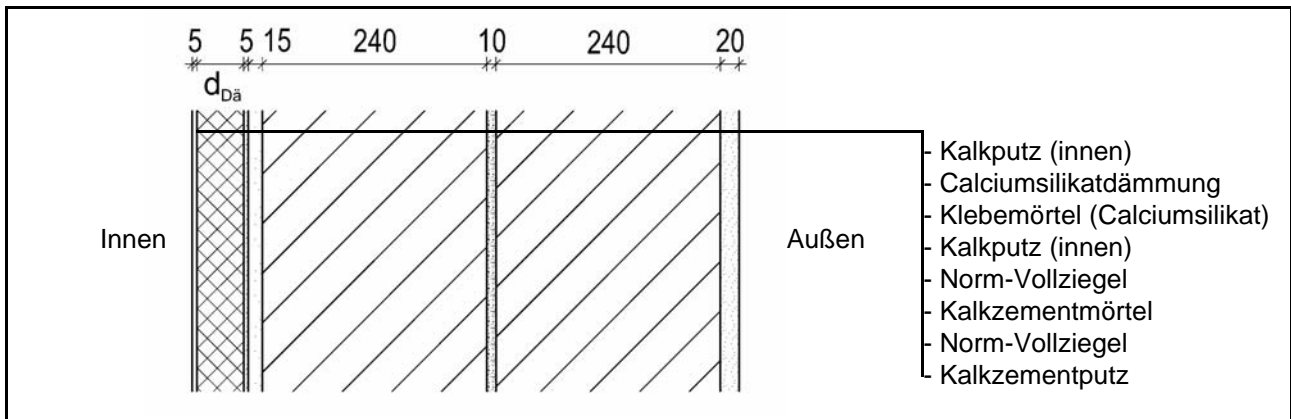
- DIN: Der Mindestwärmeschutz ist bei allen Wandaufbauten gegeben. Ab 50 mm Dämmung entstehen zu hohe Kondensatmengen.
- COND: Die DIN-Kriterien werden bei jeder gedämmten Konstruktion erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird jeweils mit 30 mm Dämmung knapp unterschritten. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Schimmelpilzwachstum ist ab 50 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).



1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30, 50 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Norm-Vollziegel	1400	0,550	18,8	1,1	31,9	0,156
Kalkzementmörtel	1025	0,225	6,2	4,2	44,5	0,150
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

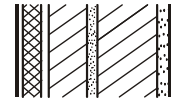
	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,94	1,44	1,74	2,20
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	0,90	0,62	0,52	0,42
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,113	0,885	1,064
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,552	1,778
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,663	0,753	0,784	0,816

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,94	1,42	1,73	2,17
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	0,90	0,63	0,53	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	<0,001	0,443	0,492
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,652	2,552	1,778
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	62,4	58,2	56,8	55,5
Innendämmsystem:					** feuchteabhängig	
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	39,7	31,1	25,1	15,7

1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



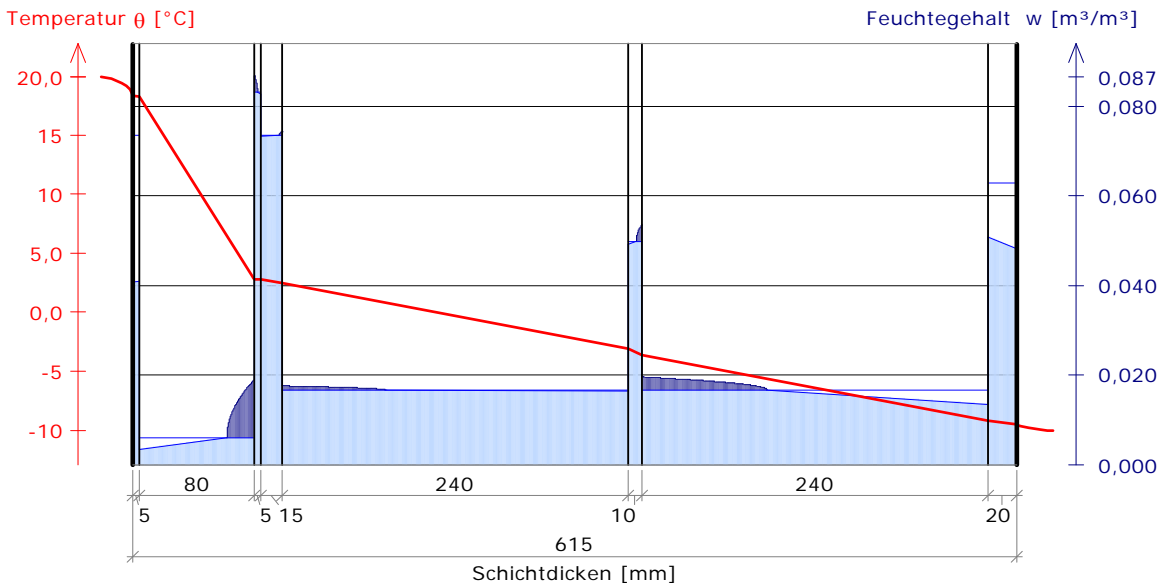
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

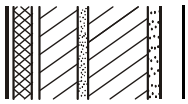
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,3	2108	1169	0,041		
				0,041		
2 Calciumsilikatplatte	18,2	2097	1166	0,003		
3 Klebemörtel (Calciumsilikatplatte)	2,8	749	749	0,019	19,5	0,17
				0,087	2,3	0,01
4 Kalkputz (innen)	2,8	746	743	0,083		
				0,073		
5 Vollziegel	2,5	732	732	0,074	2,6	0,00
				0,018	71,7	0,04
6 Kalkzementmörtel	-3,1	474	466	0,016		
				0,049		
7 Vollziegel	-3,6	453	453	0,054	4,7	0,01
				0,020	86,8	0,17
8 Kalkzementputz	-9,2	280	226	0,013		
				0,051		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	272	208	0,048		
	-10	260	208			





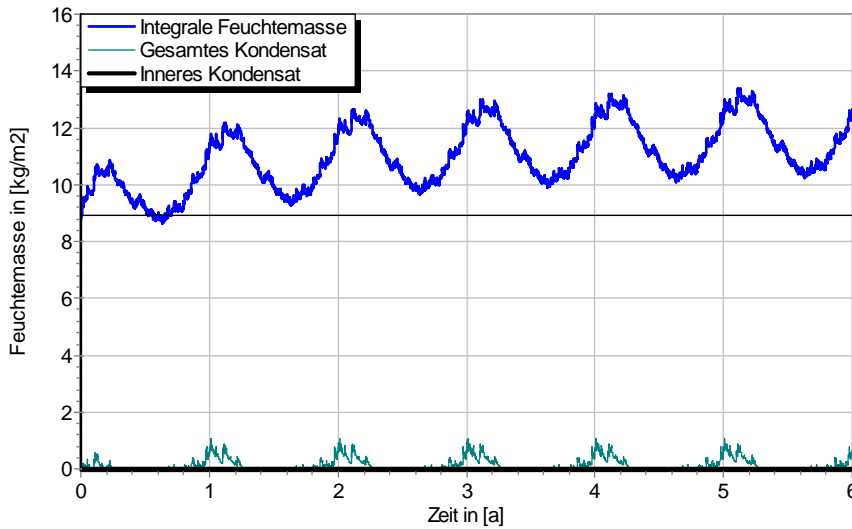
1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



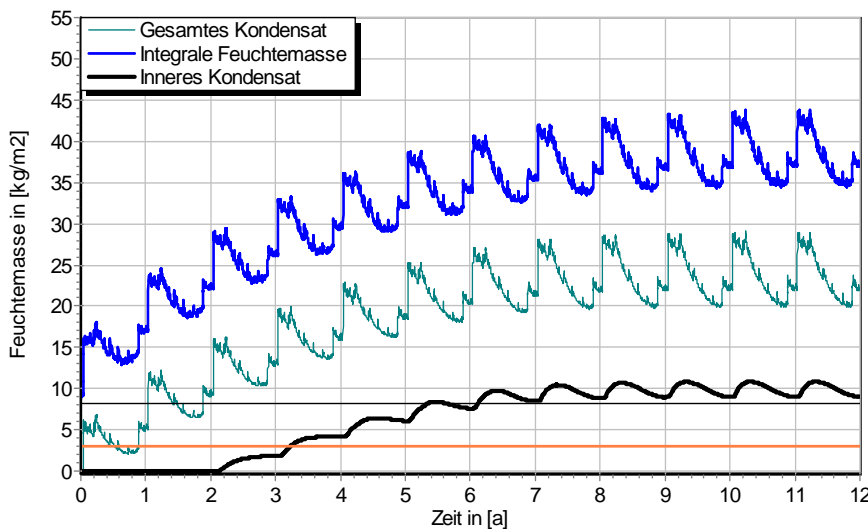
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,294	1,617	3,057	4,663
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



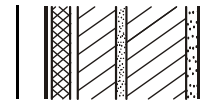
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

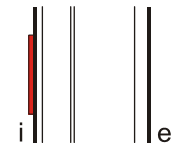
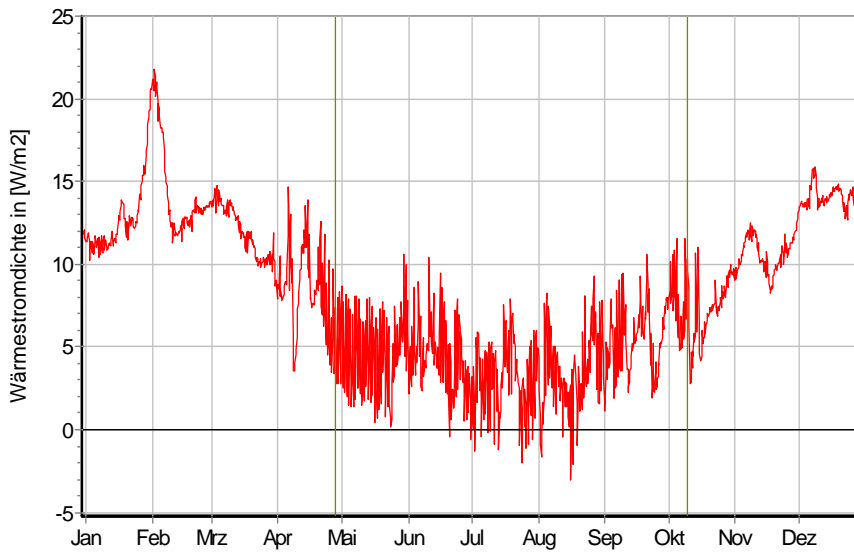
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	24,368	24,860	34,987	29,121
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	3,031	4,633*	6,478*	8,100*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



5.2 Instationäre Wärmeverluste

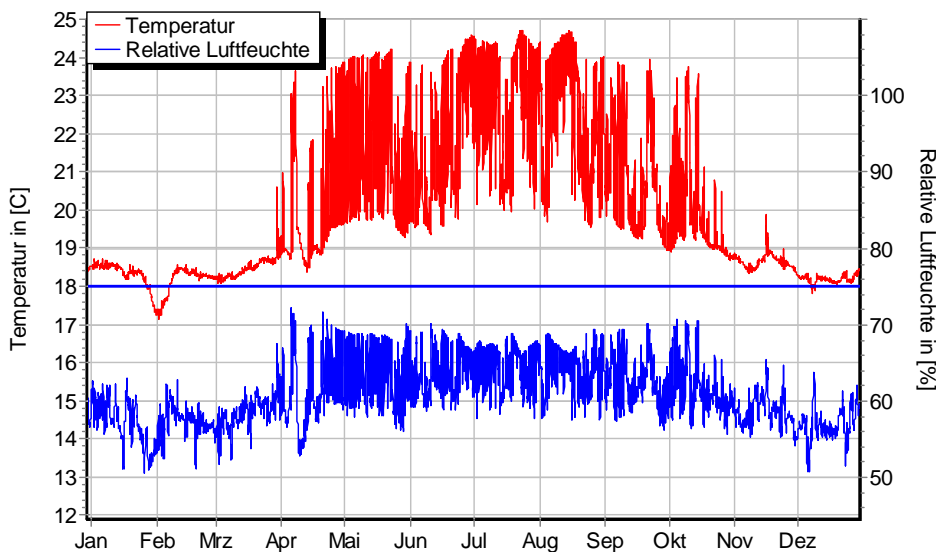


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

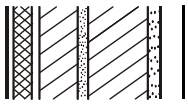
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	16,15	11,42	9,56	7,70
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	0,92	0,65	0,54	0,44
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,92	1,37	1,67	2,11

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	16,57	11,67	9,75	7,91
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	0,94	0,66	0,55	0,45
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,89	1,34	1,63	2,05

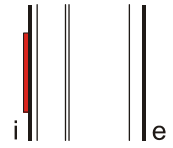
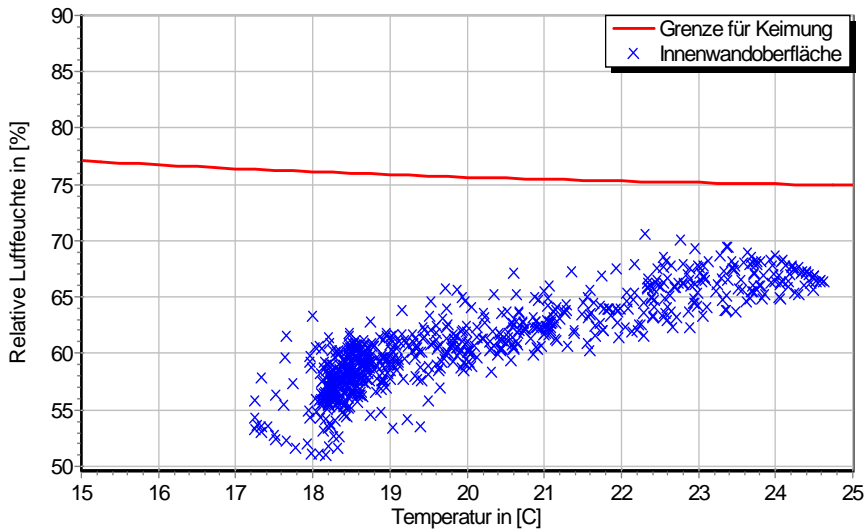
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



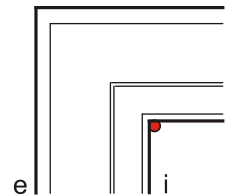
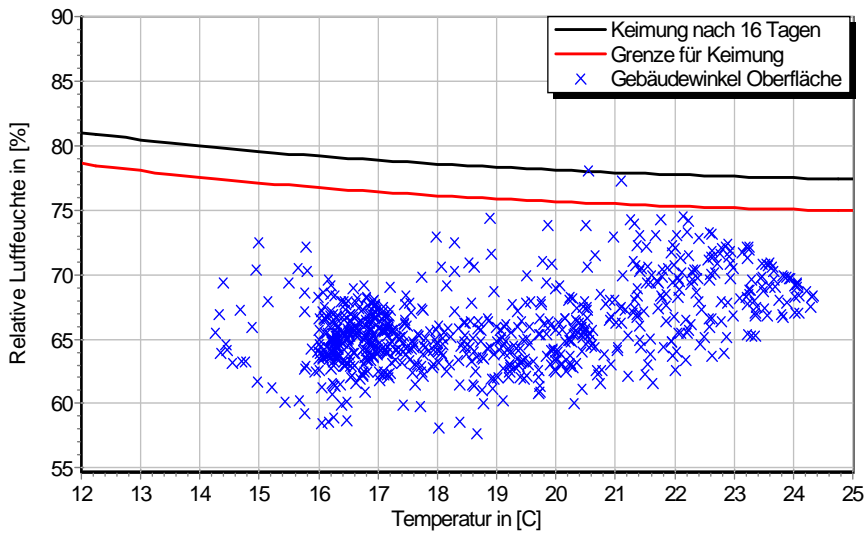
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

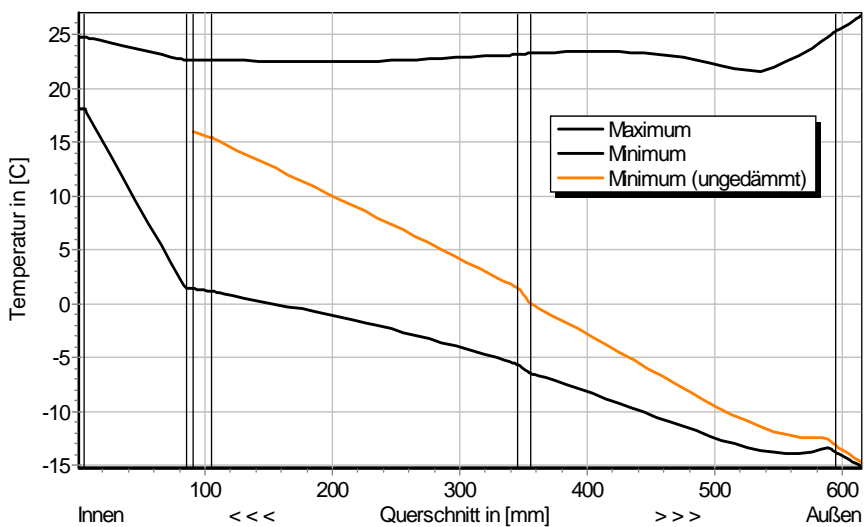


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



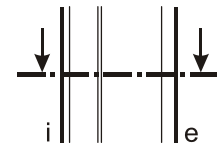
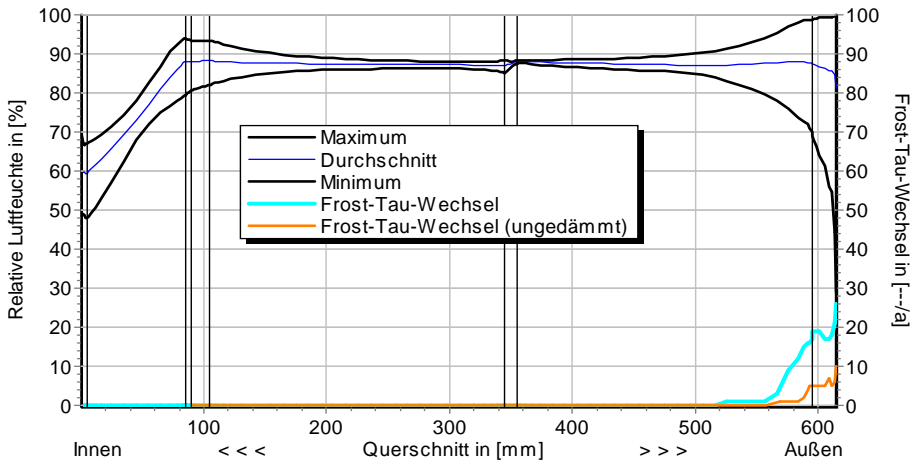
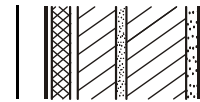
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

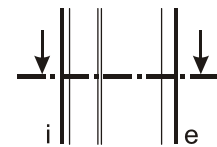
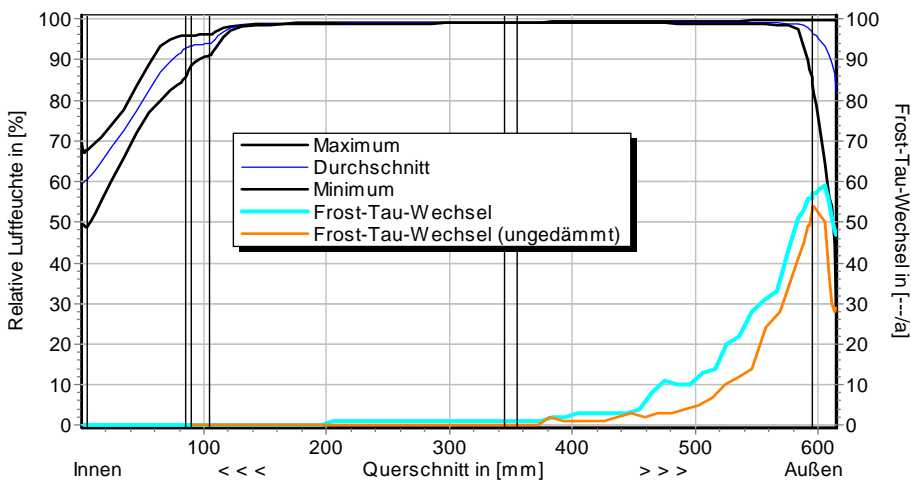


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat



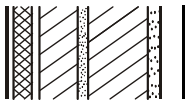
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	15	22	27	31
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	99,4	99,1	98,9
	WL_w	%	100	93,4	90,8	88,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	100,6	100,8	101,0
	CIL_φ	%	100	97,9	97,5	97,4
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	51	55	57
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	99,0	98,8	98,5
	WL_w	%	100	101,7	102,3	102,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	99,5	99,3	99,2
	CIL_φ	%	100	100,8	101,1	101,4



1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✗	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

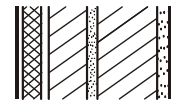
	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	✗	✓	✓	✗
COND	✗	✓	✓	✓
Simulation - ohne Schlagregen	✗	✓	✓	✓
Simulation - schlagregenexponiert	✗	○	○	○

8 Schlussfolgerungen

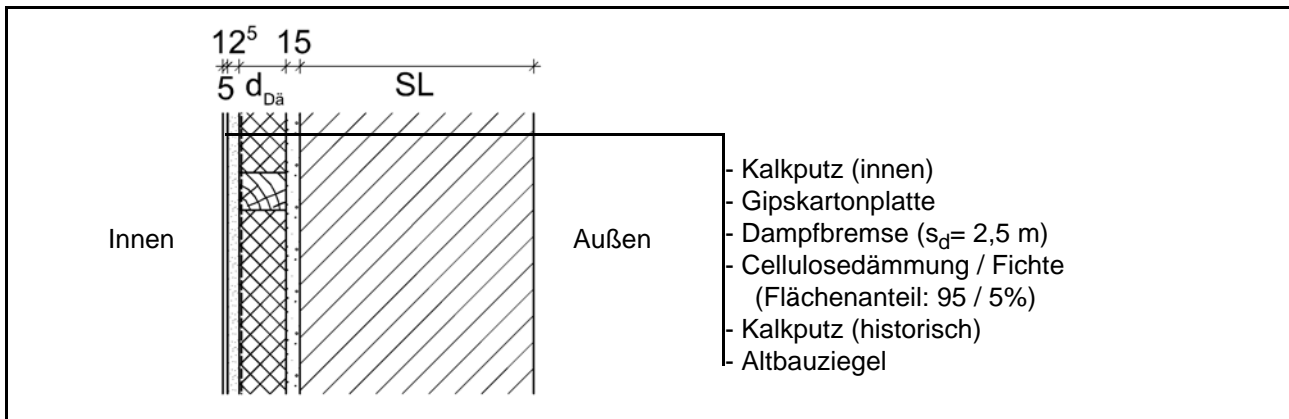
- DIN: Der Mindestwärmeschutz ist bei allen Wandaufbauten gegeben. Ab 80 mm Dämmung entstehen zu hohe Kondensatmengen.
- COND: Die DIN-Kriterien werden bei jeder gedämmten Konstruktion erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist bei allen gedämmten Wandaufbauten gegeben. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Schimmelpilzwachstum ist bei jeder gedämmten Konstruktion nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht und Steinlänge (SL): $d_{Dä} = 30\text{mm}/1$ SL, $50\text{mm}/1\frac{1}{2}$ SL, $80\text{mm}/2$ SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² ·s ^{0,5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Gipskartonplatte	850	0,20	10	0,7	55,1	0,280
Dampfbremse	800	0,15	10000	0,2	1,0	-
Cellulosedämmung	55	0,04	2,1	0,7	70,0	0,376
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,12	1,78	2,66
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,78	0,52	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,081	0,130	0,166
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,490	0,403	0,357
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,674	0,734	0,779

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

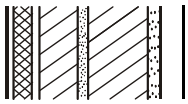
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,12	1,77	2,65
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,78	0,52	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,049	0,071	0,086
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,490	0,403	0,357
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	60,5	56,8	54,6

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,09	3,37	3,79
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,79	1,28	2,00
Wirksame Wärmekapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,5	22,0	9,91



2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt

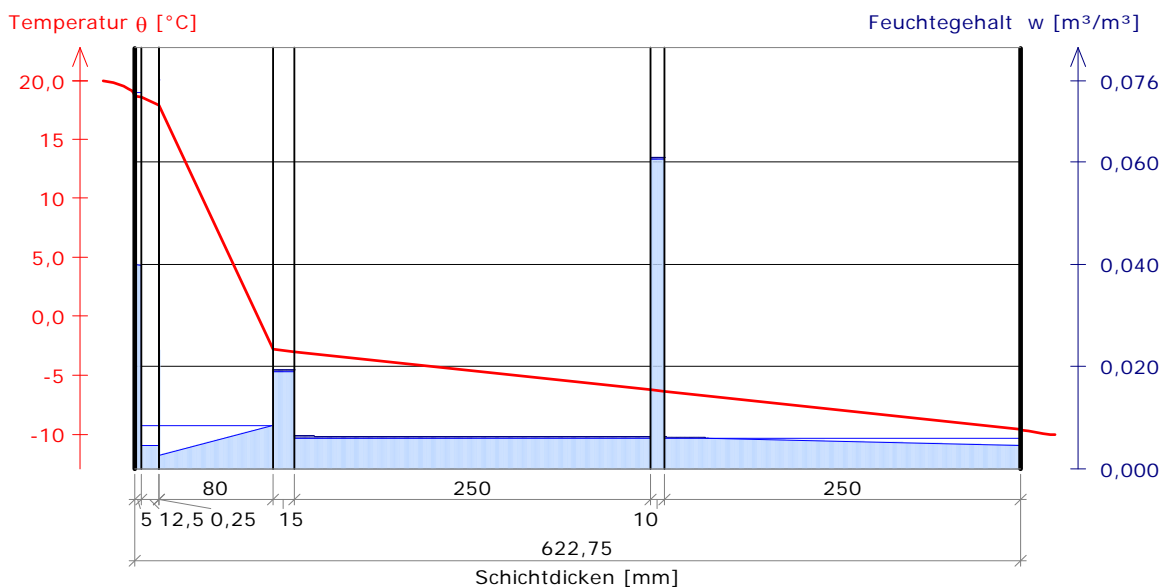
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniert, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

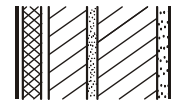
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ mit 2 Steinlängen, Schnitt durch Feldmitte Dämmung

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,7	2150	1169	0,040		
				0,040		
2 Gipskartonplatte	18,6	2141	1158	0,004		
3 Dampfbremse	17,9	2056	1133	0,005		
				0,042		
4 Zellulose-Einblasdämmung	17,9	2054	625	0,023		
				0,003		
5 Kalkputz (historisch)	-2,8	485	485	0,009	0,8	0,00
6 Altbauziegel	-3,0	477	477	0,019	15,0	0,00
				0,006	250,0	0,08
7 Lehmörtel (historisch)	-6,2	362	362	0,006	10,0	0,00
				0,061		
8 Altbauziegel	-6,3	358	358	0,006	30,1	0,00
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,6	270	208			
	-10	260	208			



2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt

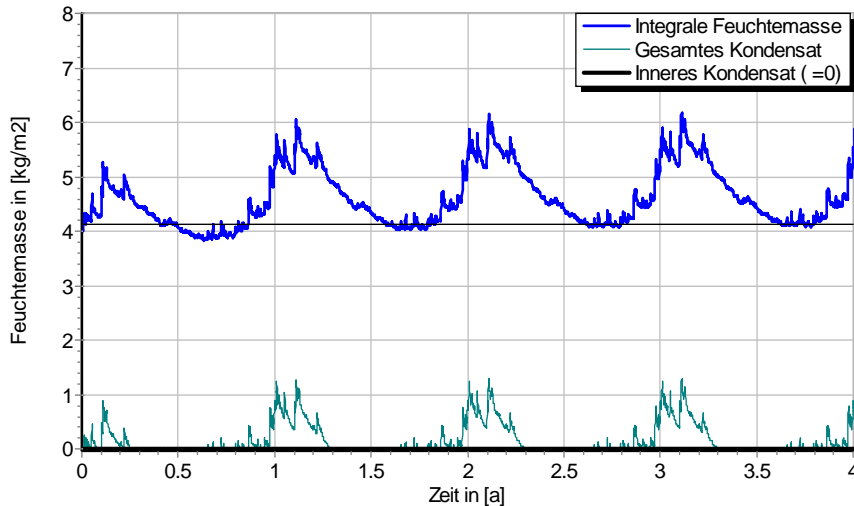


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

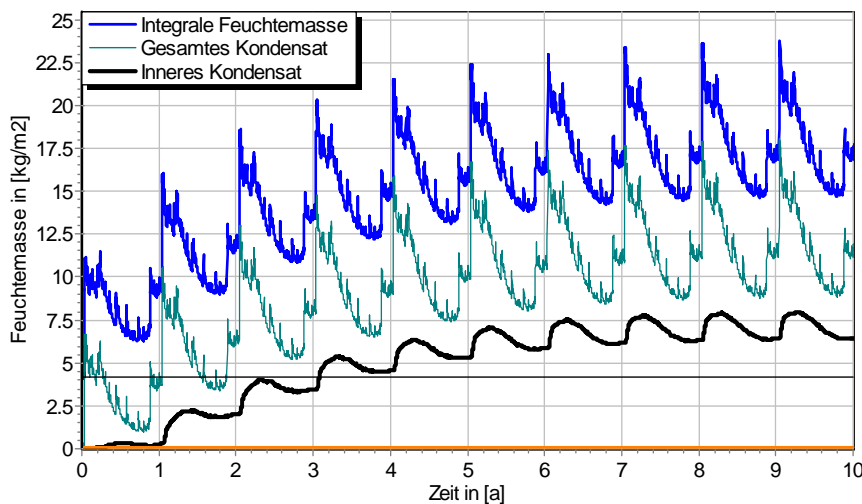


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

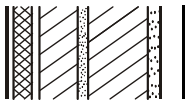
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,682	1,304	2,072
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



Wassermassen für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der un-sanitieren
 Variante (2 SL) in orange

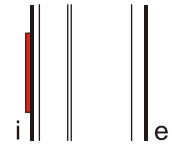
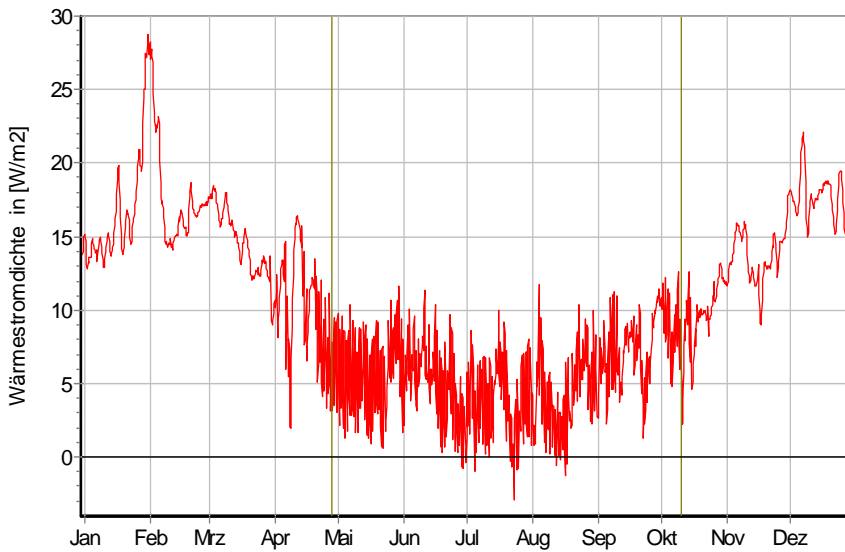
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,16	10,65	15,04	19,74
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,68	3,75*	4,41*	8,37*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt

5.2 Instationäre Wärmeverluste

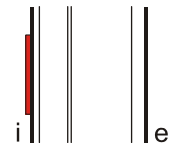
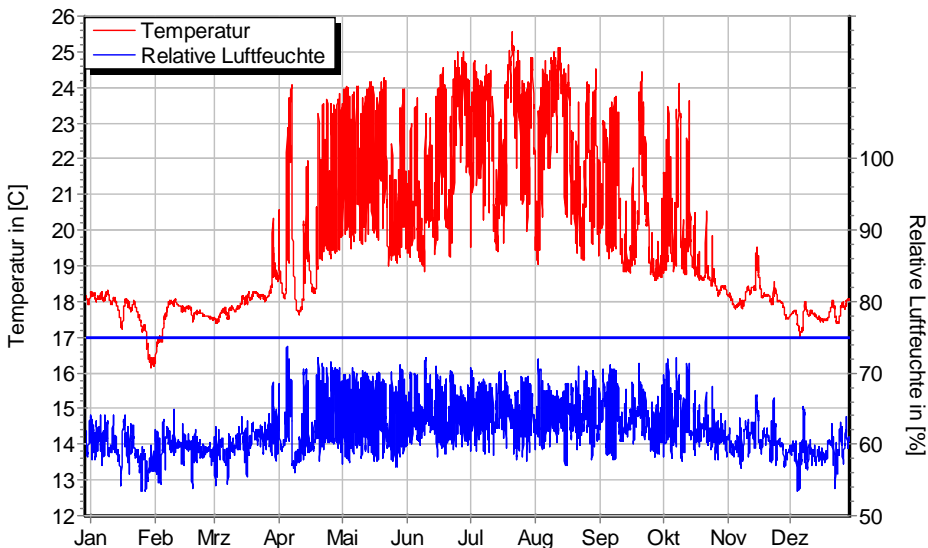


Gemittelte Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	14,37	9,56	6,58
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,07	0,82	0,54	0,37
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,31	1,05	1,67	2,50

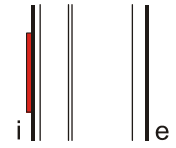
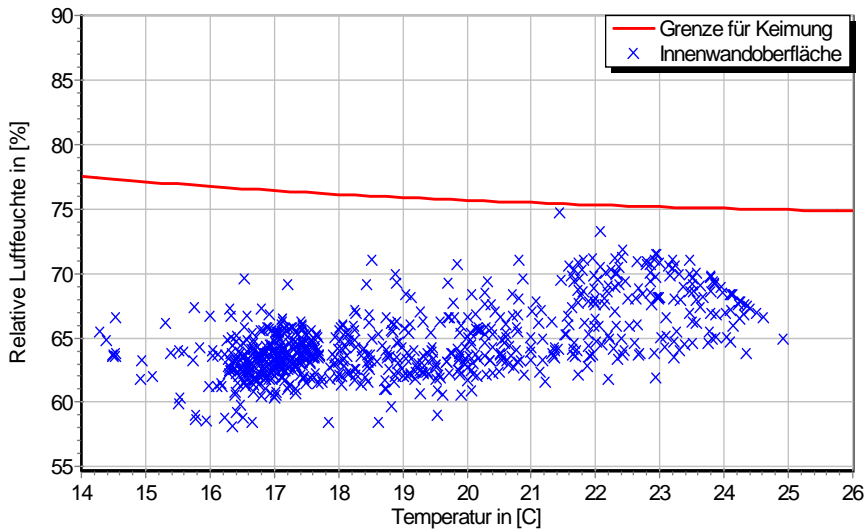
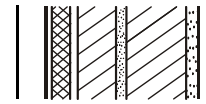
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	15,06	10,23	7,13
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,05	0,86	0,58	0,41
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,32	1,00	1,55	2,30

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

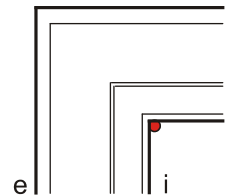
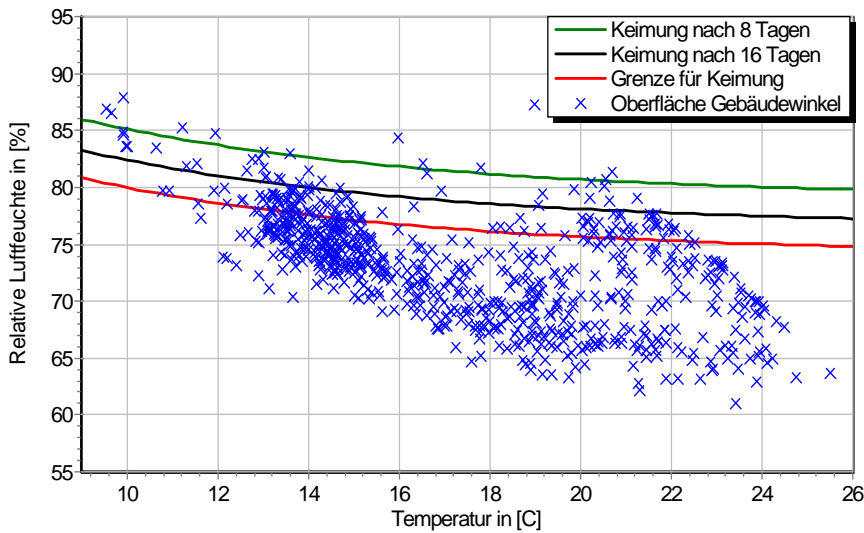


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt

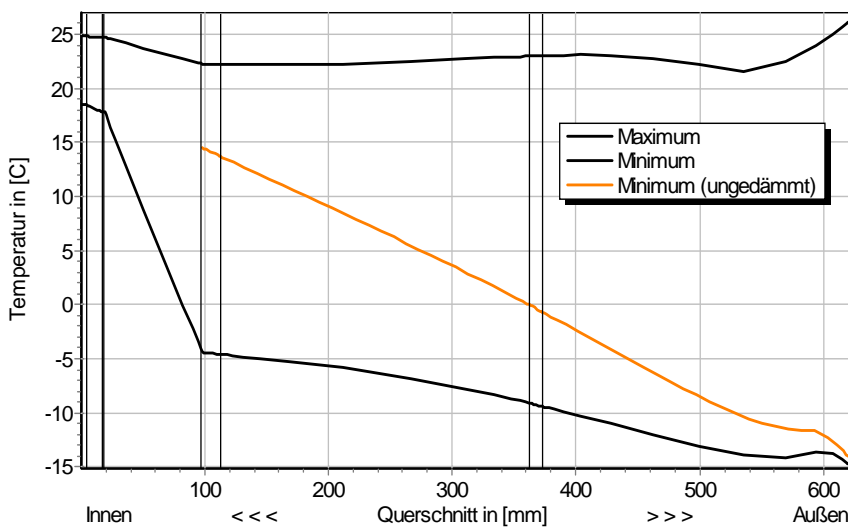


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

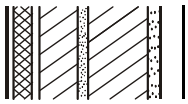


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

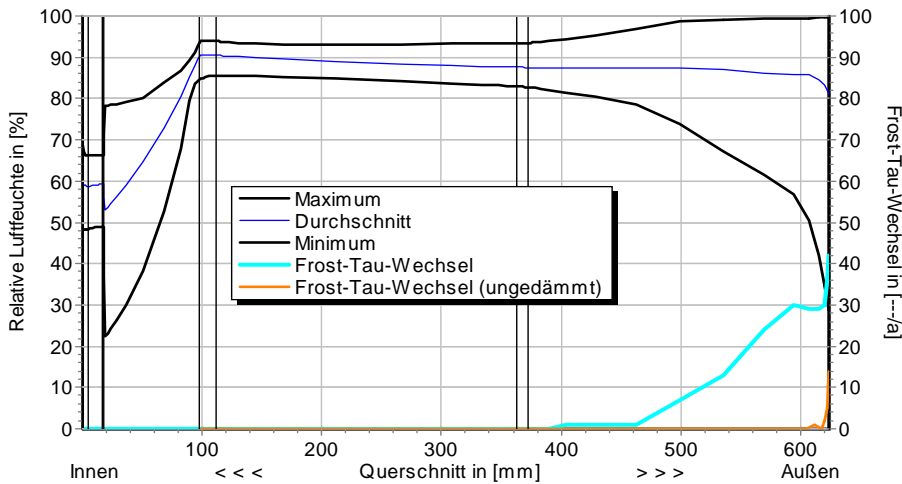
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



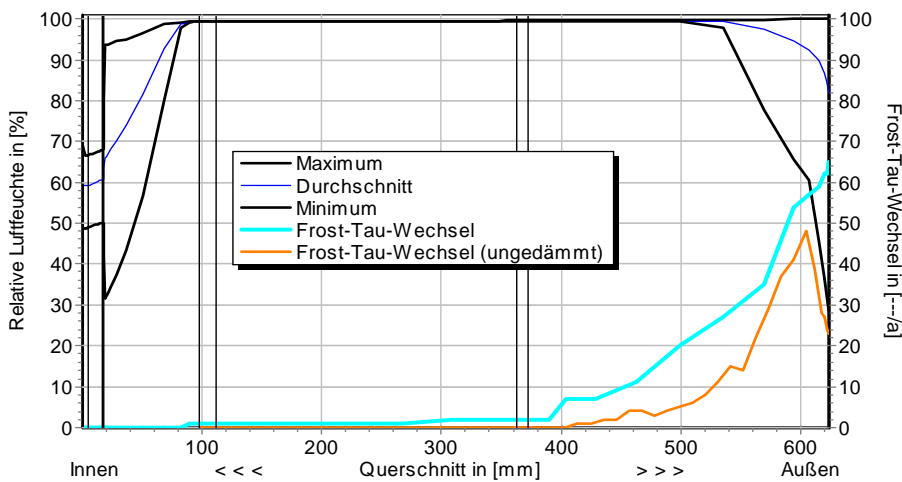
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord), Schnitt durch Feldmitte (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord), Schnitt durch Feldmitte

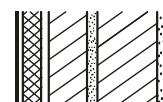


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West), Schnitt durch Feldmitte

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	30	39	45
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	94,2	94,7	95,3
	WL_w	%	100	110,0	125,9	124,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	92,7	95,5	96,3
	CIL_{φ}	%	100	90,2	88,5	88,5
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	358/357	357/357	356/356
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	59	63	68
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	96,7	96,5	96,9
	WL_w	%	100	122,2	119,6	115,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	102,8	95,4	96,3
	CIL_{φ}	%	100	99,8	96,8	95,2

2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

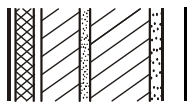
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Mit 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, 50 (1½ SL) und 80 mm (2 SL) Dämmdicke halten alle Kriterien ein.
- COND: Mit 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, 50 und 80 mm Dämmdicke halten alle Kriterien ein.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 30 mm ohne Schlagregeneinfluss gegeben, mit Schlagregen erst ab 50 mm Dämmung. Ohne Schlagregen werden alle Kriterien eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung des Kondensats ist nicht mehr gewährleistet. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

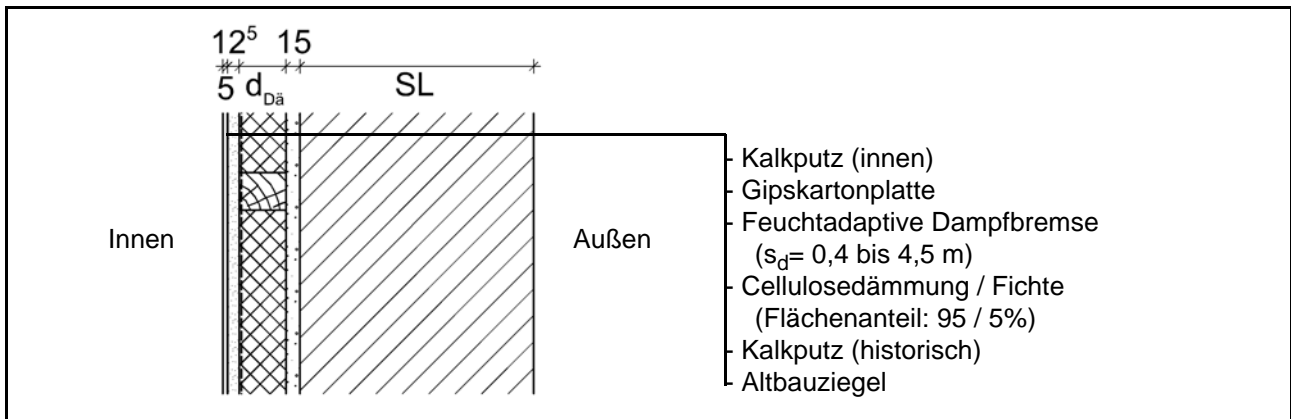
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3



2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht und Steinlänge (SL): $d_{Dä} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² ·s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Gipskartonplatte	850	0,20	10	0,7	55,1	0,280
FA-Dampfbremse	800	0,18	1600-18000	0,2	1,0	-
Cellulosedämmung	55	0,04	2,1	0,7	70,0	0,376
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

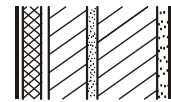
	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,12	1,78	2,66
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,0	0,78	0,52	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,081	0,042	0,075
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,490	0,316	0,273
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,680	0,740	0,784

* mit $R_{si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,12	1,77	2,66
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,0	0,78	0,52	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,490	0,316	0,273
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	60,5	57,1	54,6
Innendämmsystem (Winterklima):			** feuchteabhängig			
s_d -Wert	s_{di}	m	-	5,09	5,37	5,79
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,79	1,28	2,00
Wirksame Wärmekapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,5	20,6	9,91

2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt



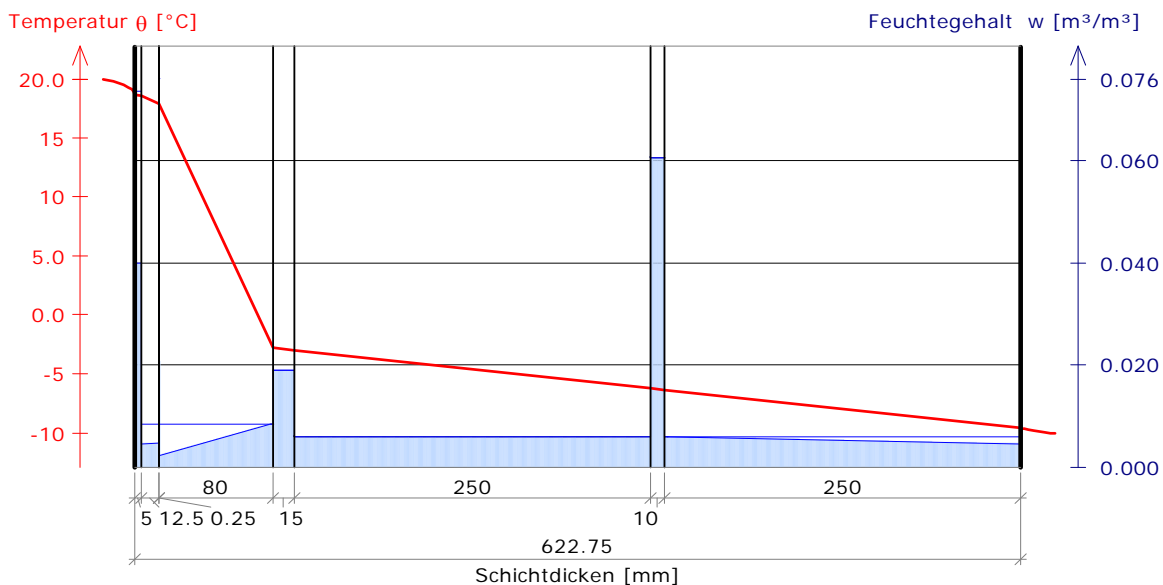
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

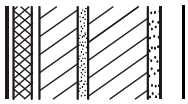
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ mit 2 Steinlängen, Schnitt durch Feldmitte Dämmung

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,7	2151	1169	0,040		
				0,040		
2 Gipskartonplatte	18,6	2141	1162	0,005		
				0,005		
3 FA-Dampfbremse (sd= 4.8m)	17,9	2056	1146	0,042		
				0,021		
4 Zellulose-Einblasdämmung	17,9	2054	559	0,002		
				0,008	0,0	0,00
5 Kalkputz (historisch)	-2,8	485	485	0,019	15,0	0,00
				0,019		
6 Altbauziegel	-3,0	477	477	0,006	250,0	0,00
				0,006		
7 Lehmörtel (historisch)	-6,2	362	362	0,061	10,0	0,00
				0,061		
8 Altbauziegel	-6,3	358	358	0,006	0,0	0,00
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,6	270	208			
	-10	260	208			





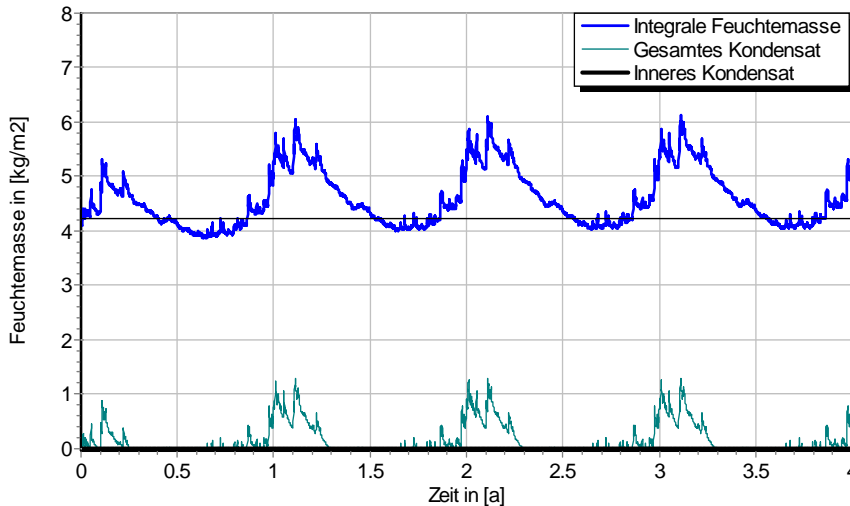
2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

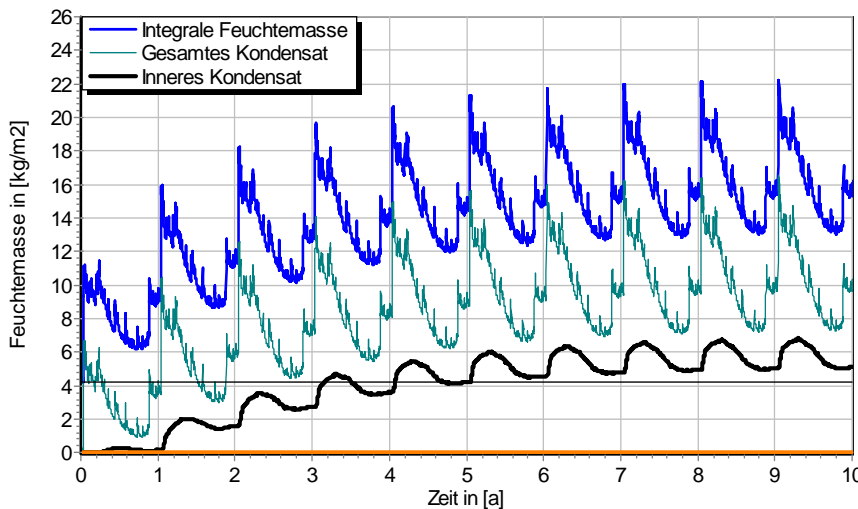


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,666	1,233	1,917
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

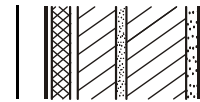


Wassermassen für
 $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante (2 SL) in orange

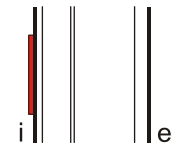
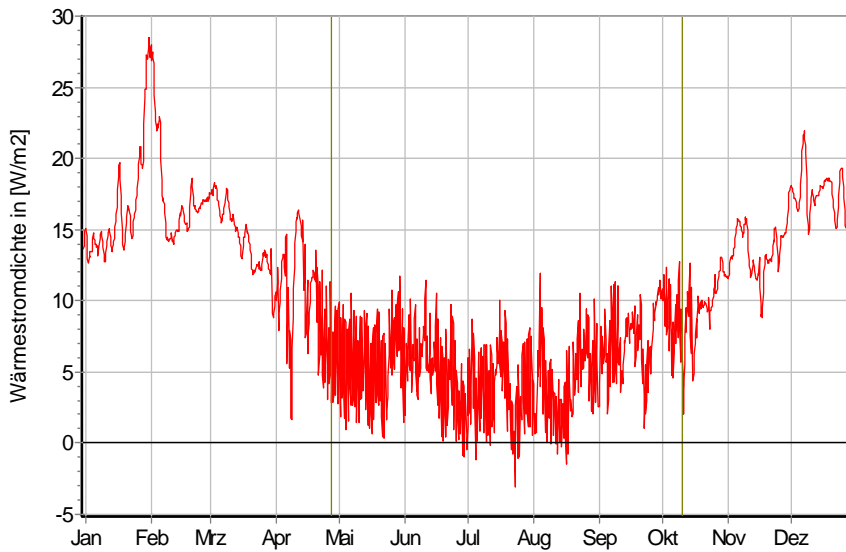
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,162	9,325	13,641	18,127
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	2,798*	3,523*	6,882*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt



5.2 Instationäre Wärmeverluste

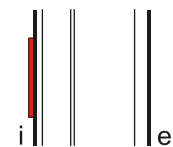
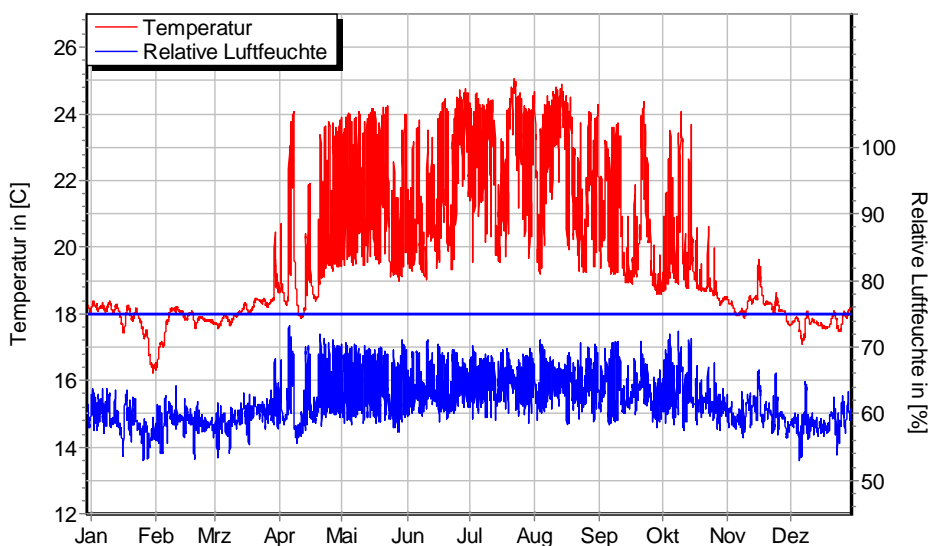


Gemittelte Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

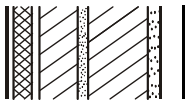
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	14,24	9,49	6,55
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,07	0,81	0,54	0,37
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,31	1,06	1,68	2,52

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	14,44	9,84	6,96
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,05	0,82	0,56	0,40
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,32	1,05	1,62	2,36

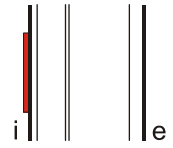
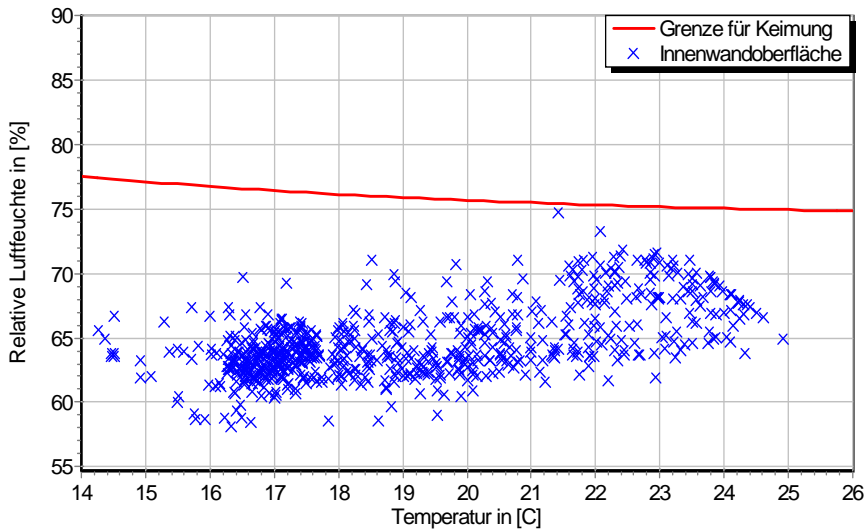
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



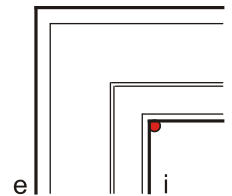
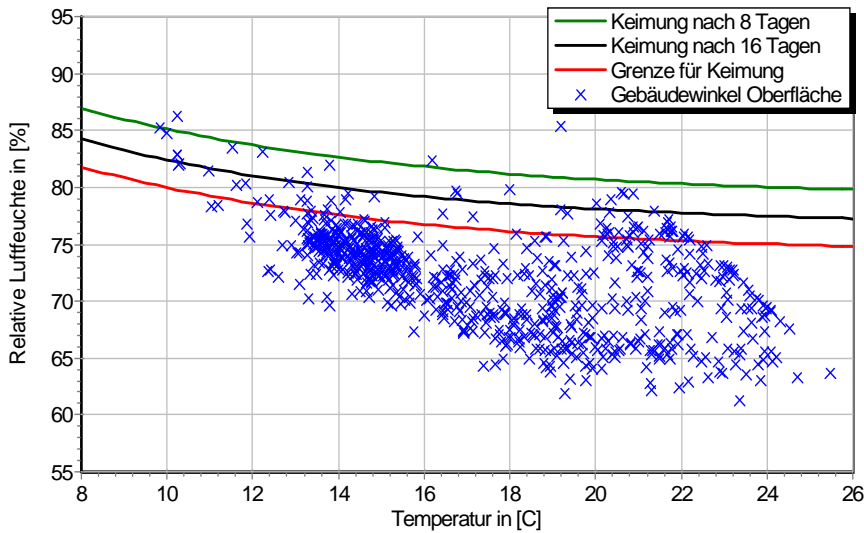
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt

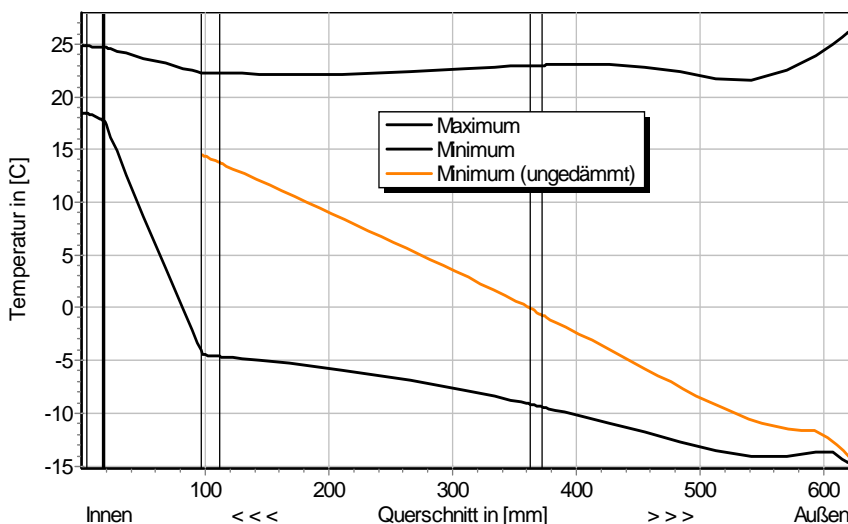


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



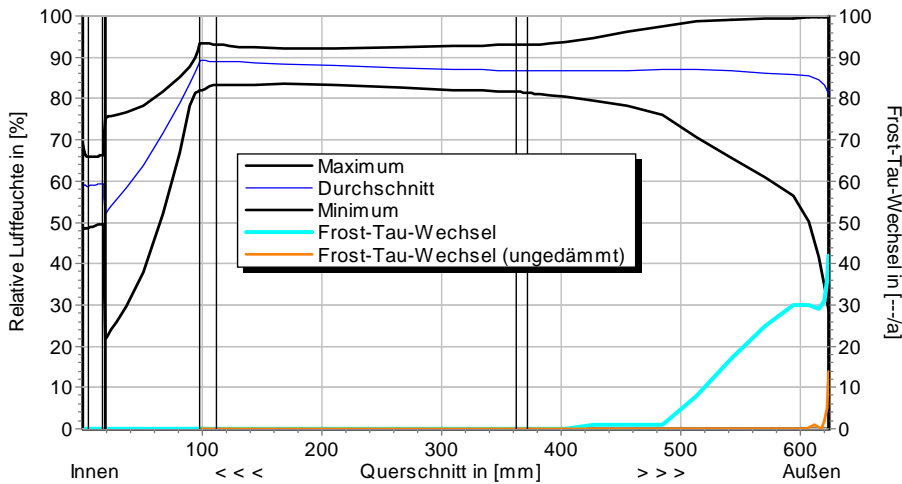
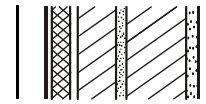
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

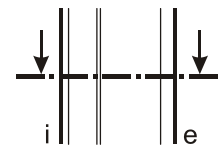
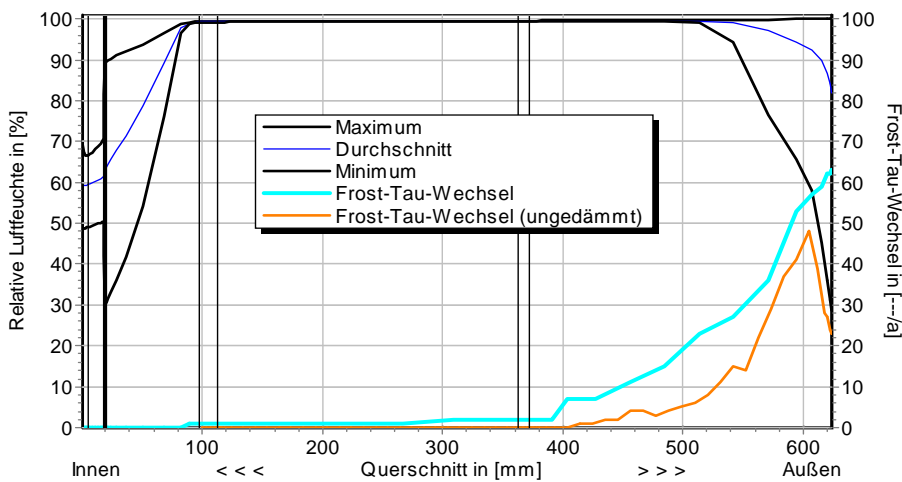


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord), Schnitt durch Feldmitte (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt



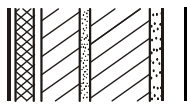
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord), Schnitt durch Feldmitte



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West), Schnitt durch Feldmitte

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	30	39	45
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,2	94,7	95,3
	WL_w	%	100	110,3	125,9	124,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	93,4	96,0	96,4
	CIL_φ	%	100	90,1	88,6	88,5
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	304/358	357/357	356/356
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	56	63	68
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,4	96,9	96,8
	WL_w	%	100	119,3	120,2	115,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	92,8	95,0	96,2
	CIL_φ	%	100	98,2	96,7	95,2



2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

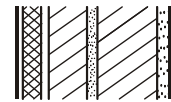
- DIN: Mit 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, die Konstruktionen mit 50 (1½ SL) und 80 (2 SL) mm Dämmdicke halten alle Kriterien ein.
- COND: Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht erfüllt, die Konstruktionen mit 50 und 80 mm Dämmdicke halten alle Kriterien ein.
- Simulation: Mindestwärmeschutz ist jeweils ab 30 mm gegeben. Ohne Schlagregeneinfluss werden alle Kriterien eingehalten.
Bei hoher eindringender Schlagregenmenge treten zu hohe Kondensatmengen auf und die Verdunstung des Kondensats ist nicht mehr gewährleistet. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

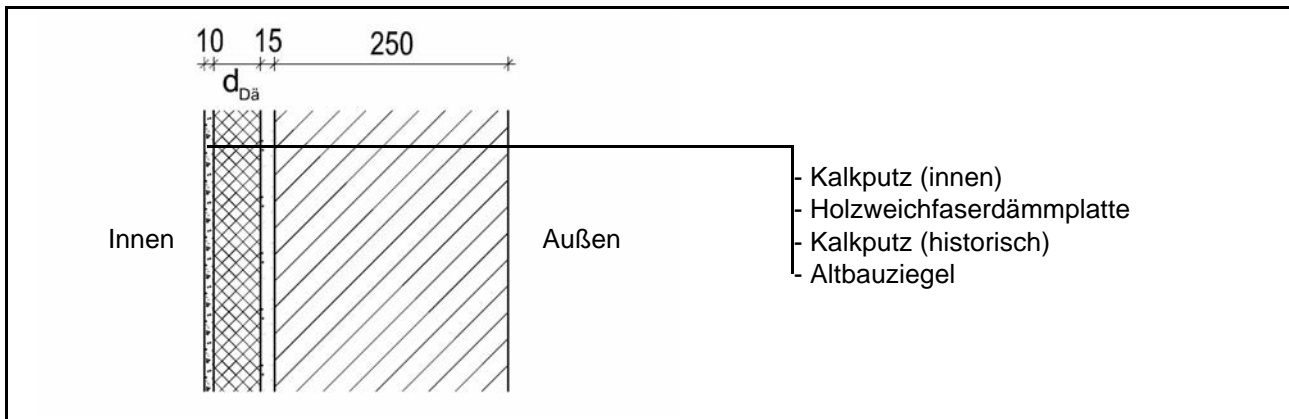
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3

3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 80$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzweichfaserdämmplatte	180	0,045	5	2,4	31,2	0,016
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

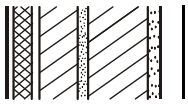
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,23	2,12	2,57
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,71	0,44	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,894	1,373	1,187
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,225	1,458	1,263
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,757	0,832	0,853

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,23	2,12	2,56
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,71	0,44	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,584	1,158	1,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,228	1,458	1,263
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	59,5	55,6	54,6
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,31	0,51	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,90	1,79	2,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	31,7	17,7	13,9



3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

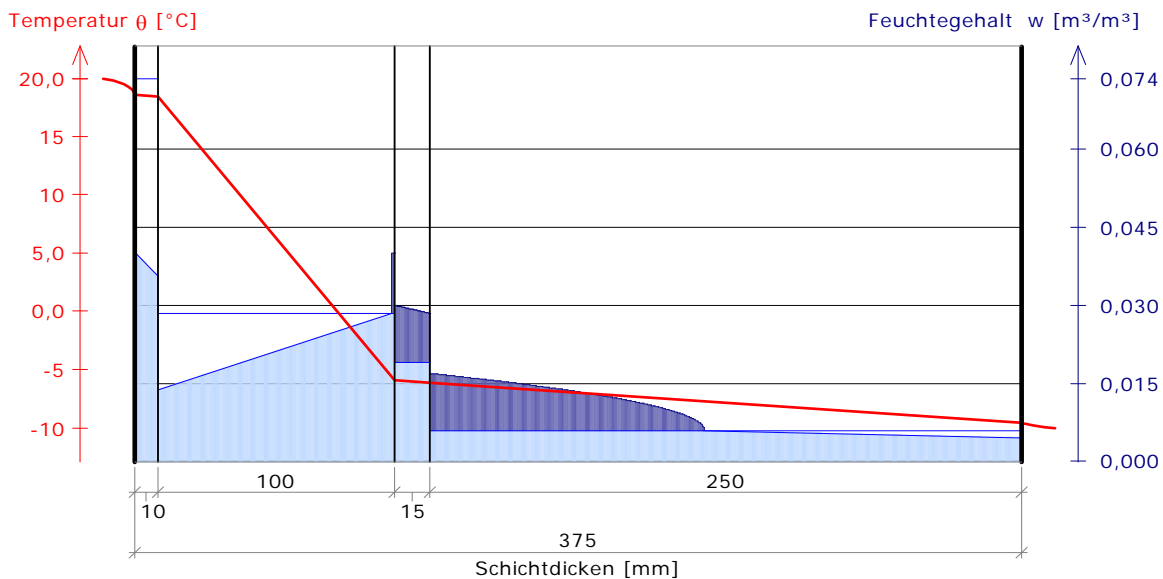
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

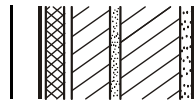
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

	Schicht/Material	$\theta \text{ [}^\circ\text{C]}$	$P_{\text{sat}} \text{ [Pa]}$	$P \text{ [Pa]}$	$w \text{ [m}^3/\text{m}^3]$	$d_c \text{ [mm]}$	$M_c \text{ [kg/m}^2]$
	Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
		18,6	2140	1169			
1	Kalkputz (innen)				0,040		
		18,4	2120	1026	0,036		
2	HWFD-Functionsschicht				0,014		
					0,040	0,2	0,00
3	Kalkputz (historisch)	-5,9	370	370	0,030		
					0,028	15,0	0,15
4	Altbauziegel	-6,1	364	364	0,017		
					0,005	116,0	0,85
		-9,6	270	208			
	Luftschicht (Kaltseite)	-10	260	208			



3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

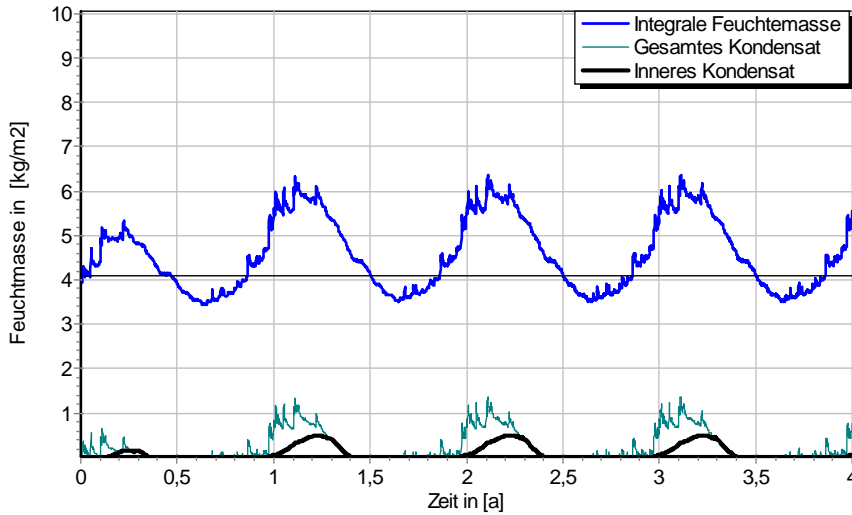


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



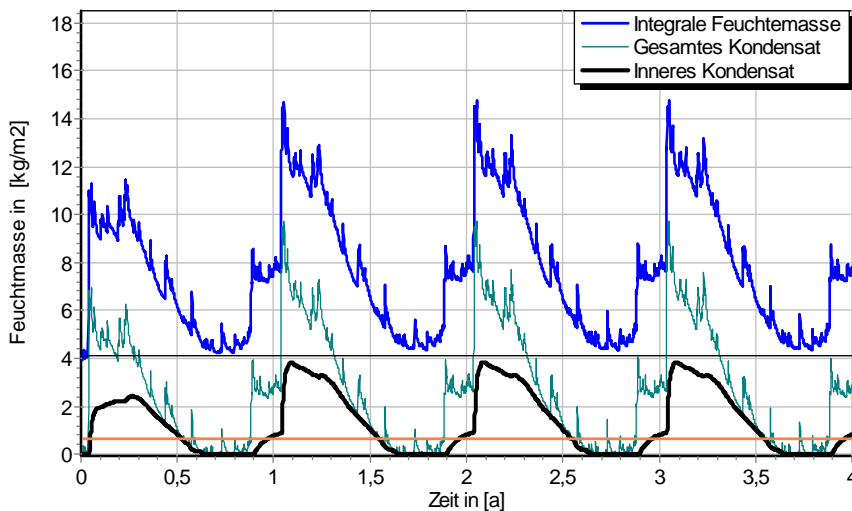
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	1,481	2,119	2,262
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,294	0,465	0,497

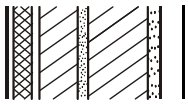


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

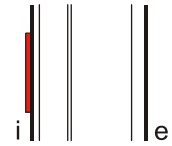
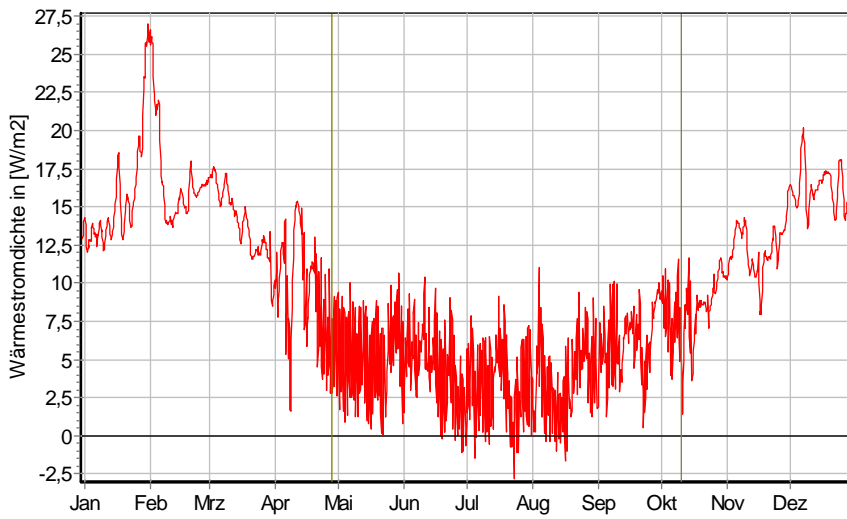
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	8,992	10,195	10,662
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	2,155*	2,903*	3,159*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

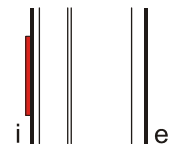
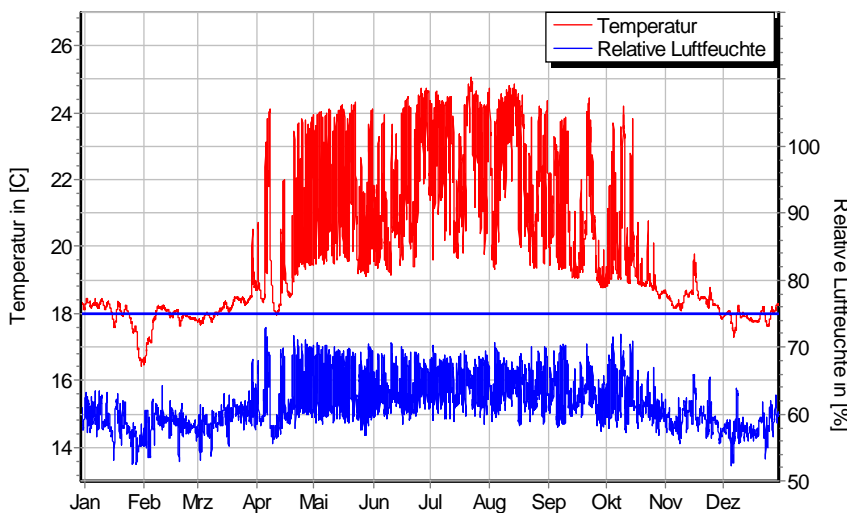


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	13,39	8,10	6,70
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,53	0,76	0,46	0,38
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,48	1,14	2,00	2,46

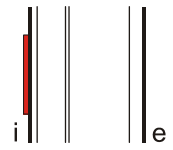
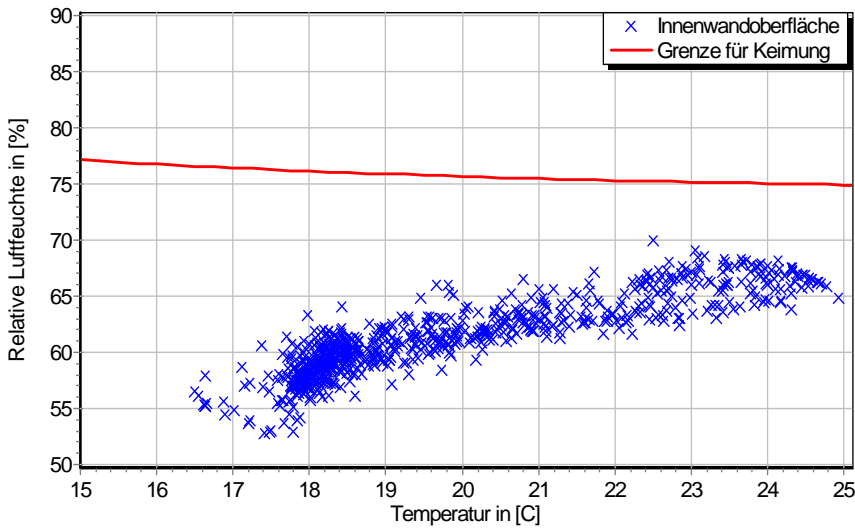
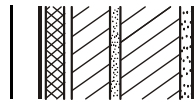
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	13,61	8,50	7,15
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	0,77	0,77	0,48	0,41
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	1,12	1,12	1,90	2,29

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

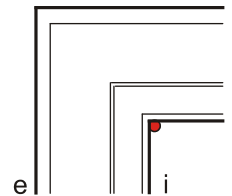
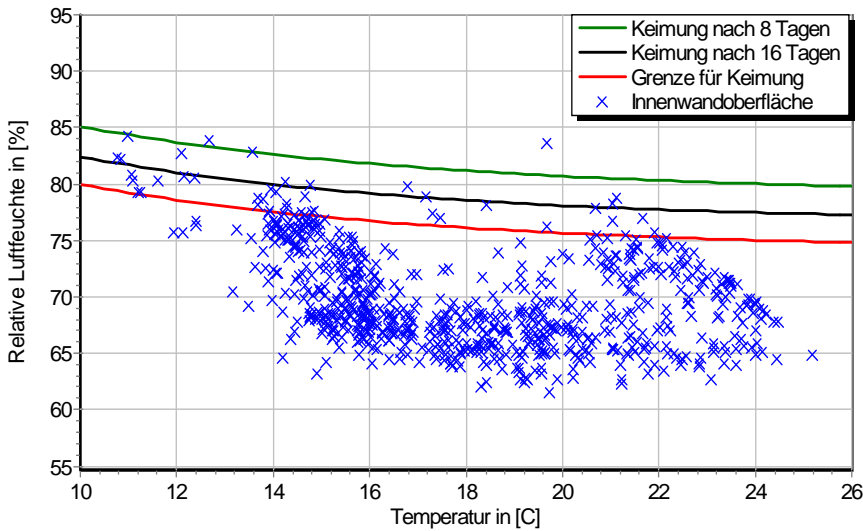


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

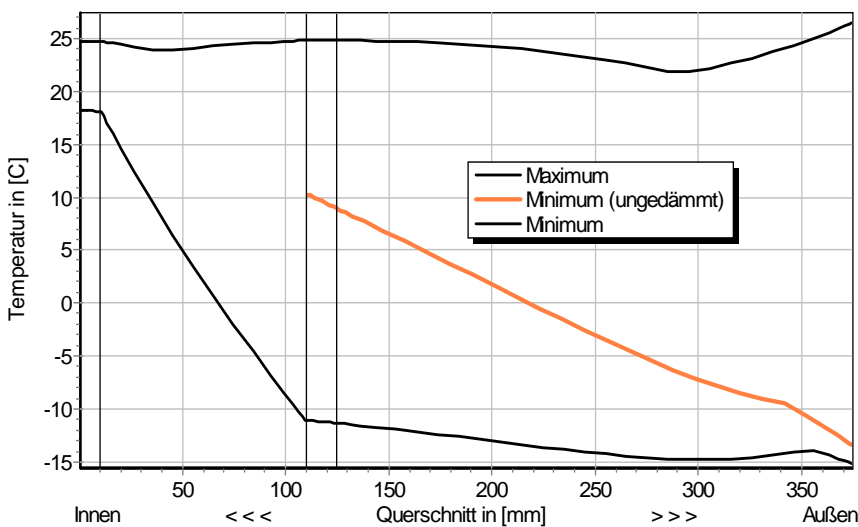


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

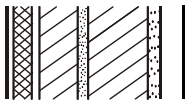


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

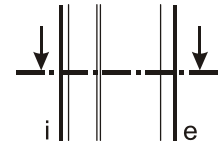
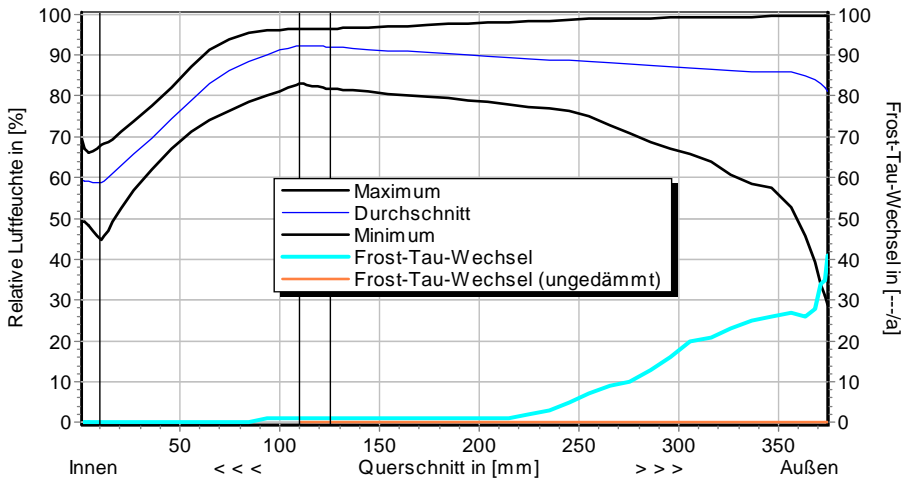
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



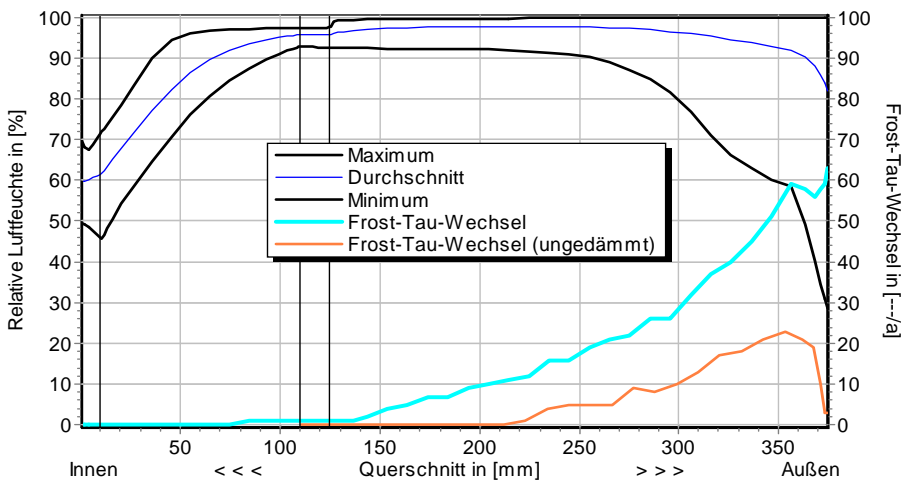
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

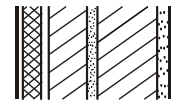


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	33	42	45
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,2	93,4	94,2
	WL_w	%	100	113,6	125,4	127,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,2	94,0	93,9
	CIL_φ	%	100	93,2	91,1	90,4
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	58	67	69
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,3	94,6	94,4
	WL_w	%	100	119,7	124,6	125,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	93,0	92,1	91,8
	CIL_φ	%	100	98,9	97,1	96,1

3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✗	✗	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

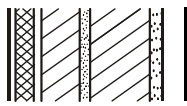
8 Schlussfolgerungen

- DIN: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- COND: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist mit 40 mm Dämmung knapp nicht gegeben. Ohne Schlagregeneinwirkung wird der maximal erlaubte massebezogene Feuchtegehalt nur mit 100 mm Dämmung nicht überschritten. In allen Aufbauten verdunstet das Tauwasser vollständig. Schimmelwachstum im Gebäudewinkel ist jeweils nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: Keine der Varianten sollte ausgeführt werden.

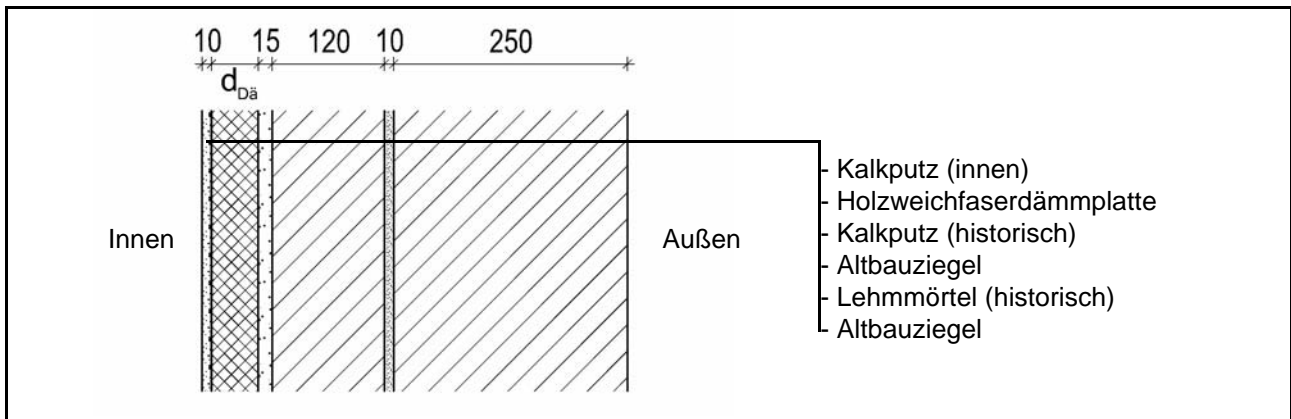
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1



3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 40, 80 und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzweichfaserdämmplatte	180	0,045	5	2,4	31,2	0,016
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

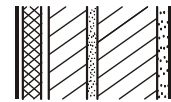
	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,49	1,40	2,29	2,73
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,51	0,64	0,41	0,35
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,576	1,267	1,117
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,137	1,370	1,175
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,528	0,772	0,839	0,858

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,49	1,39	2,28	2,73
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,51	0,64	0,41	0,35
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,404	1,111	0,969
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,138	1,370	1,175
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	72,5	58,4	55,2	54,4
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,31	0,51	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,90	1,79	2,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	31,7	17,7	13,9

3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



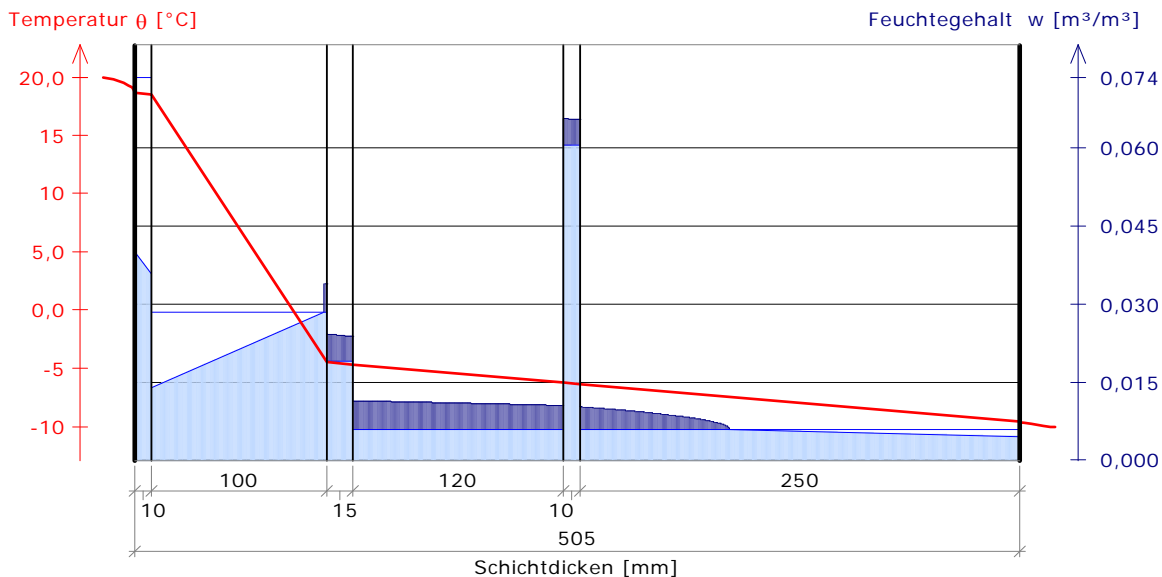
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

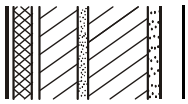
	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

	Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m ³ /m ³]	d_c [mm]	M_c [kg/m ²]
	Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1	Kalkputz (innen)	18,7	2151	1169	0,040		
					0,036		
2	HWFDP-Funktionsschicht	18,5	2132	1035	0,014		
					0,034	0,2	0,00
3	Kalkputz (historisch)	-4,5	420	420	0,024	15,0	0,07
					0,024		
4	Altbauziegel	-4,7	413	413	0,011	120,0	0,60
					0,010		
5	Lehmmörtel (hist.)	-6,2	362	362	0,066	10,0	0,05
					0,065		
6	Altbauziegel	-6,4	358	358	0,010	84,9	0,25
					0,005		
	Luftschicht (Kaltseite)	-9,6	270	208			
		-10	260	208			





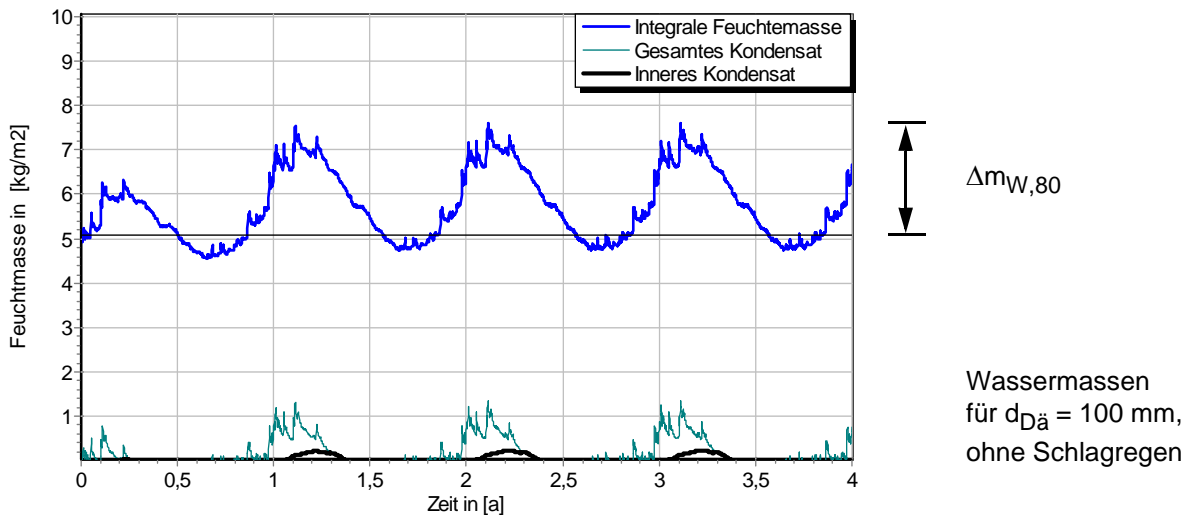
3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

5 Simulationsergebnisse

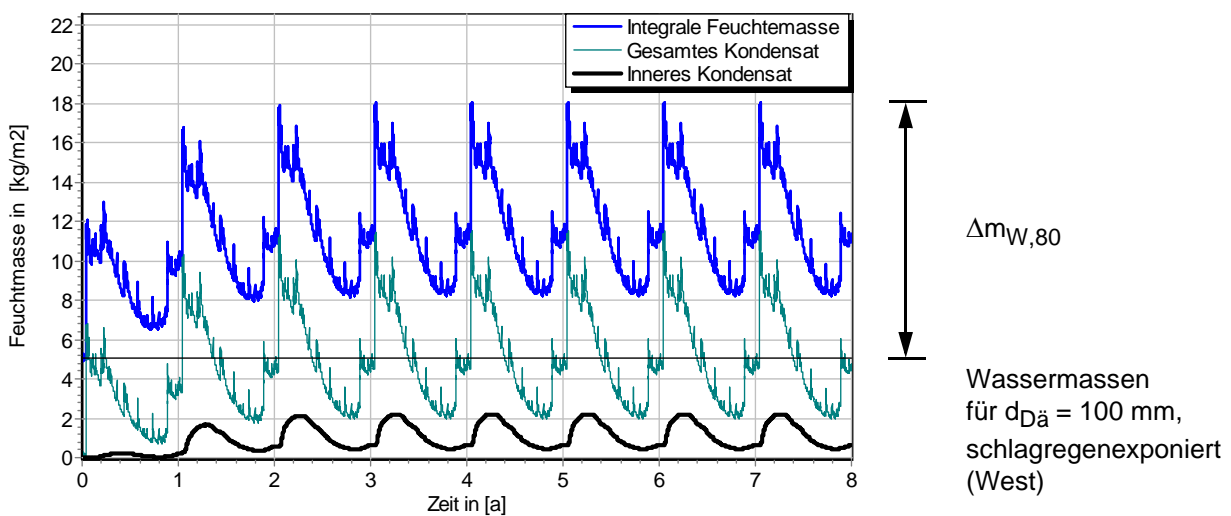
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen

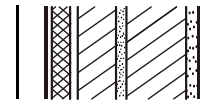


Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,350	1,647	2,331	2,520
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,108	0,227	0,239

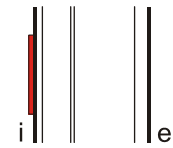
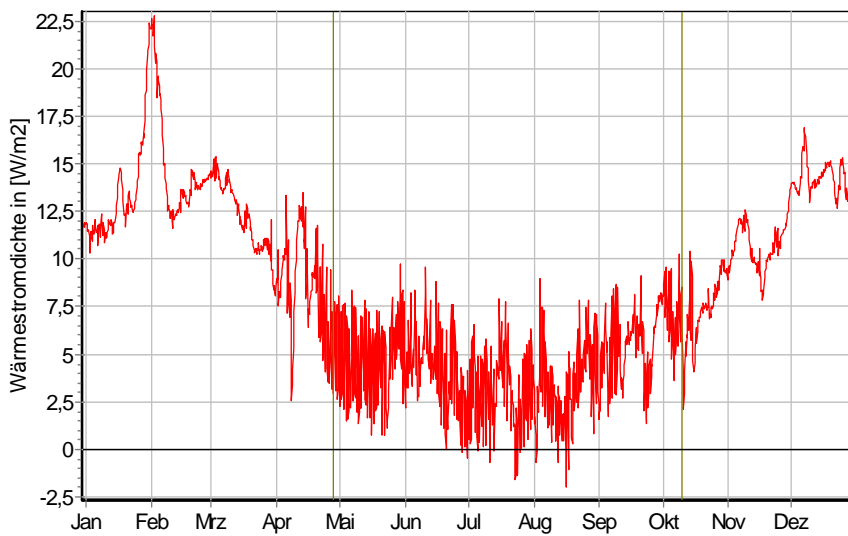


Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,927	10,419	12,327	13,006
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,895	1,849	2,210

3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

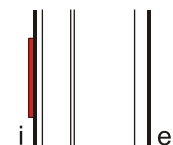
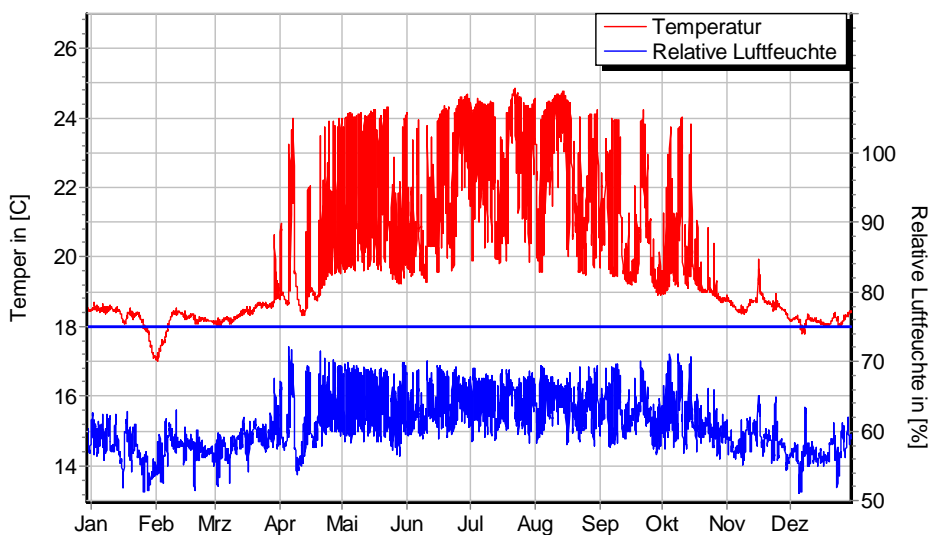


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

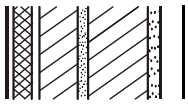
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,42	11,69	7,42	6,24
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1,23	0,66	0,42	0,35
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	0,64	1,33	2,20	2,65

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,08	11,70	7,61	6,49
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1,22	0,67	0,43	0,37
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	0,65	1,33	2,14	2,54

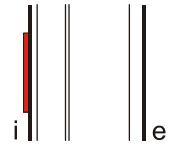
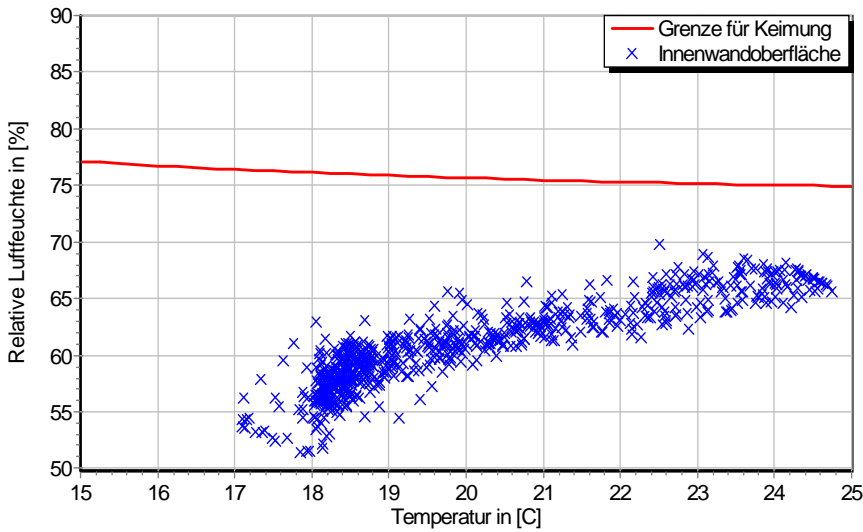
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



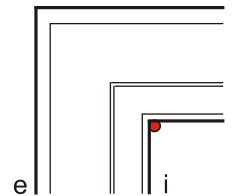
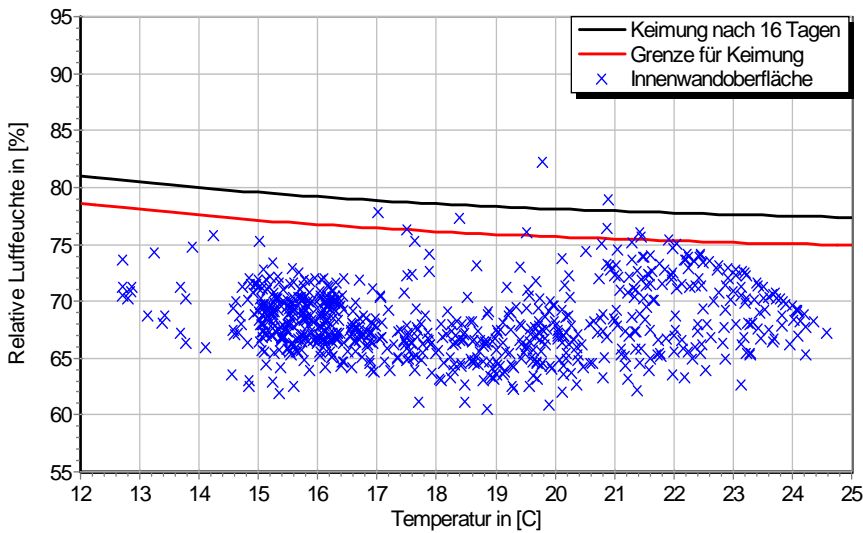
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

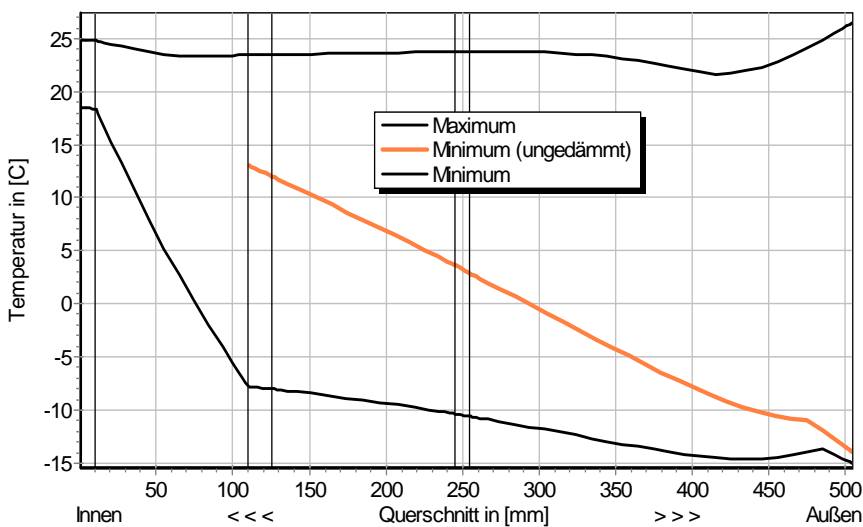


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



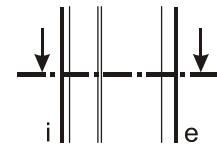
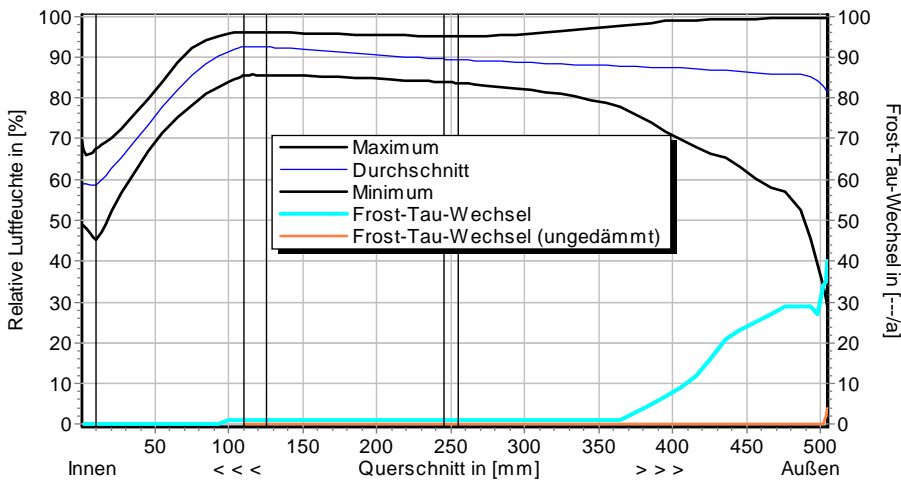
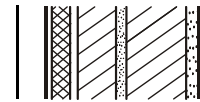
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

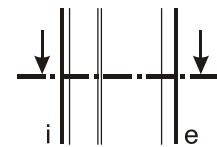
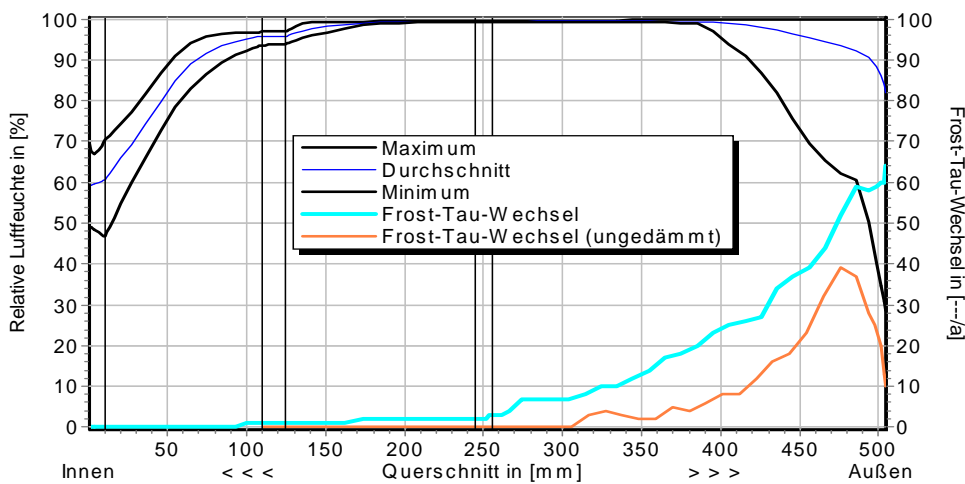


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



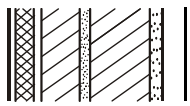
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	10	36	44	45
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,1	94,5	94,3
	WL_w	%	100	121,8	131,5	130,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,0	97,2	97,3
	CIL_φ	%	100	94,8	92,9	92,3
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	39	62	68	69
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,6	96,1	95,5
	WL_w	%	100	116,4	120,0	120,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	95,9	95,4	95,2
	CIL_φ	%	100	98,4	95,9	95,3



3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,f}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s,f}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s,f}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

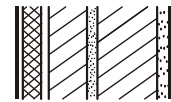
- DIN: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- COND: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist bei allen gedämmten Wandaufbauten gegeben. Bei Varianten ohne Schlagregeneinwirkung wird der maximal erlaubte massebezogene Feuchtegehalt nie überschritten, mit dagegen schon. Das Tauwasser verdunstet ohne Schlagregen immer, mit Regenbelastung in keinem Aufbau. Schimmelwachstum im Gebäudewinkel ist jeweils nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

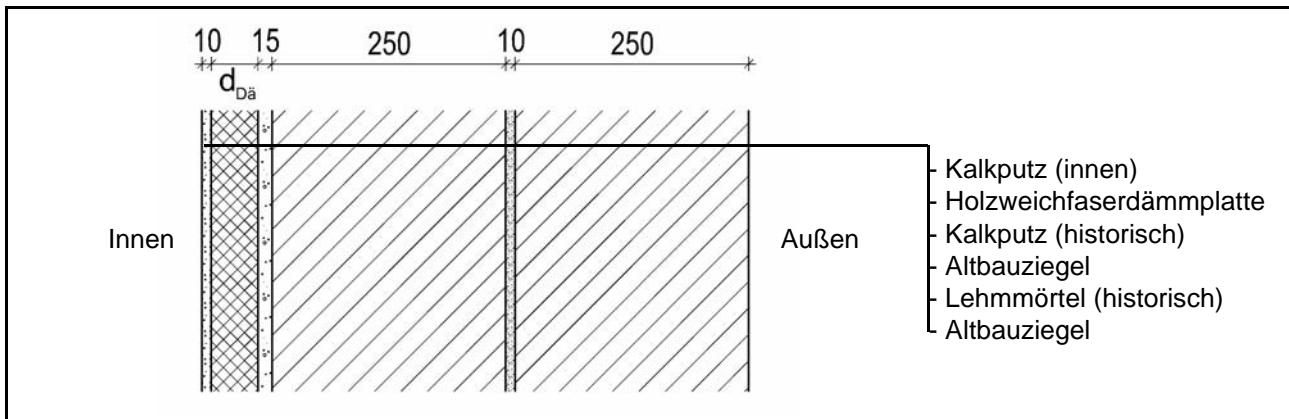
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatte, außen unverputzt: 4.2
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.2

3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 80$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzweichfaserdämmplatte	180	0,045	5	2,4	31,2	0,016
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,66	1,56	2,45	2,89
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,21	0,58	0,38	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,311	1,159	1,044
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,234	1,326	1,131
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,583	0,786	0,846	0,863

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

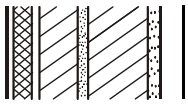
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,66	1,56	2,45	2,89
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,21	0,58	0,38	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,182	1,022	0,907
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,092	1,326	1,131
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	57,6	54,9	54,1

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,31	0,51	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,90	1,79	2,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	31,7	17,7	13,9



3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

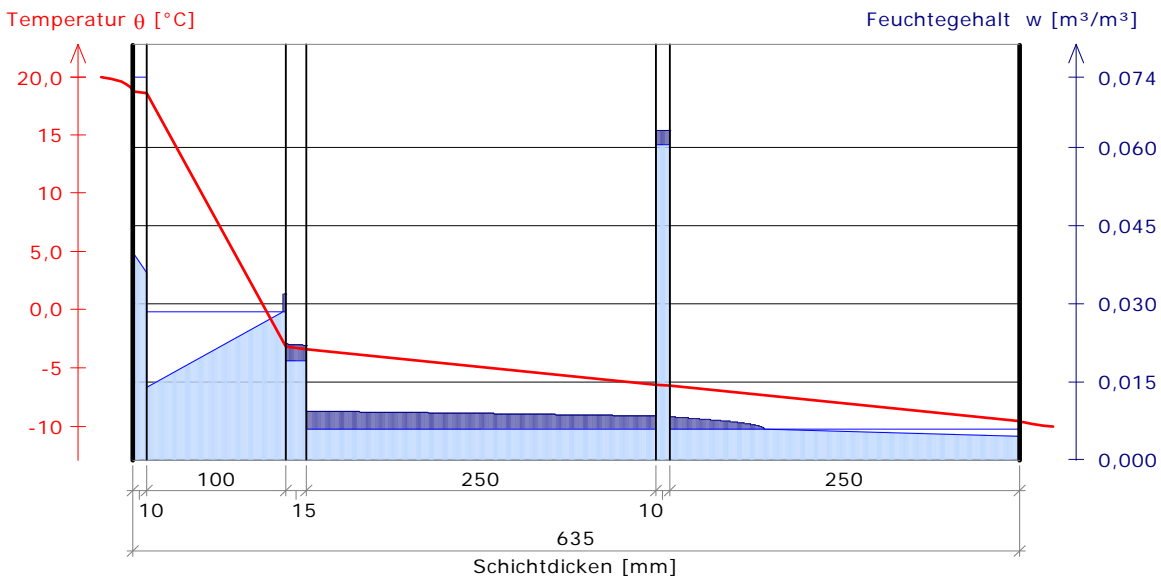
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

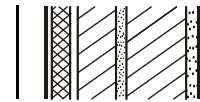
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,7	2160	1169	0,040		
				0,036		
2 HWFDP-Funktionsschicht	18,6	2143	1044	0,014		
3 Kalkputz (historisch)				0,032	0,2	0,00
	-3,2	469	469	0,022		
4 Altbauziegel				0,022	15,0	0,04
	-3,4	462	462	0,009	250,0	0,73
5 Lehmörtel (hist.)				0,008		
	-6,4	356	356	0,063	10,0	0,03
6 Altbauziegel				0,063		
	-6,5	352	352	0,008	67,2	0,10
Luftschicht (Kaltseite)				0,005		
	-9,6	269	208			
	-10	260	208			



3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

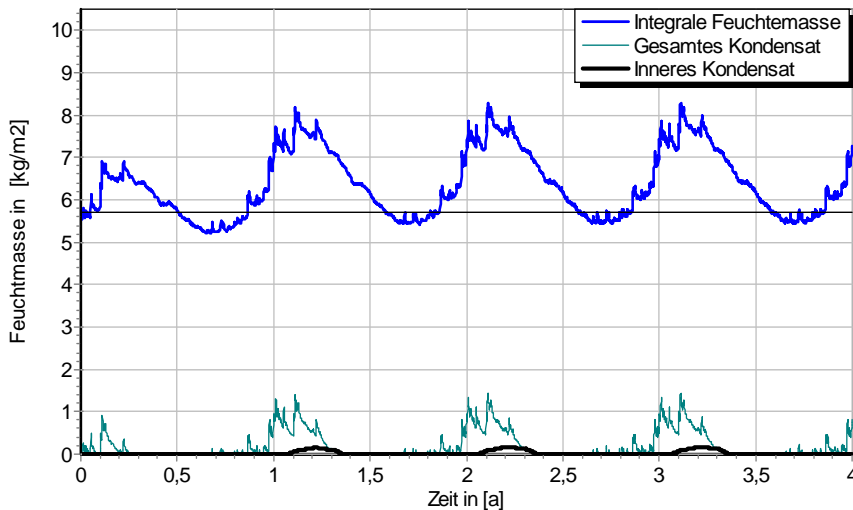


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



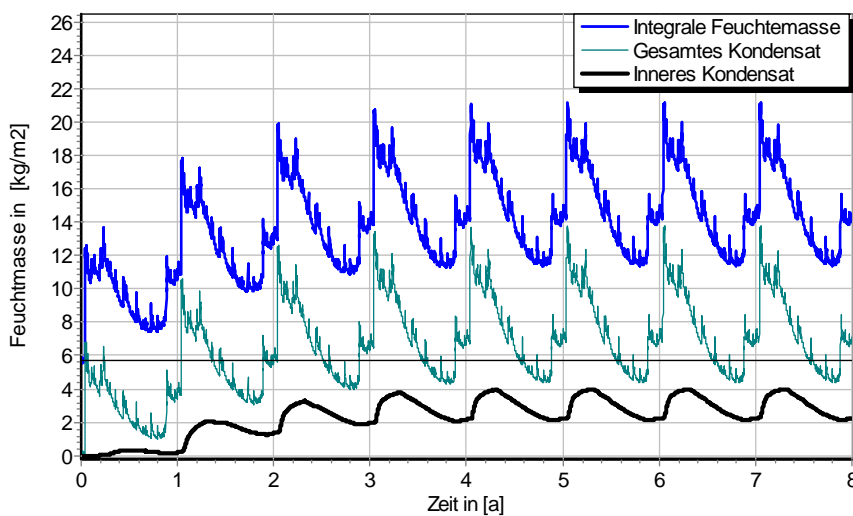
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

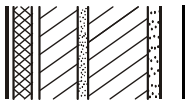
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,434	1,639	2,375	2,589
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,012	0,144	0,166



$\Delta m_{W,80}$

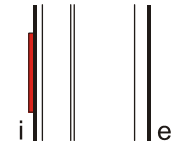
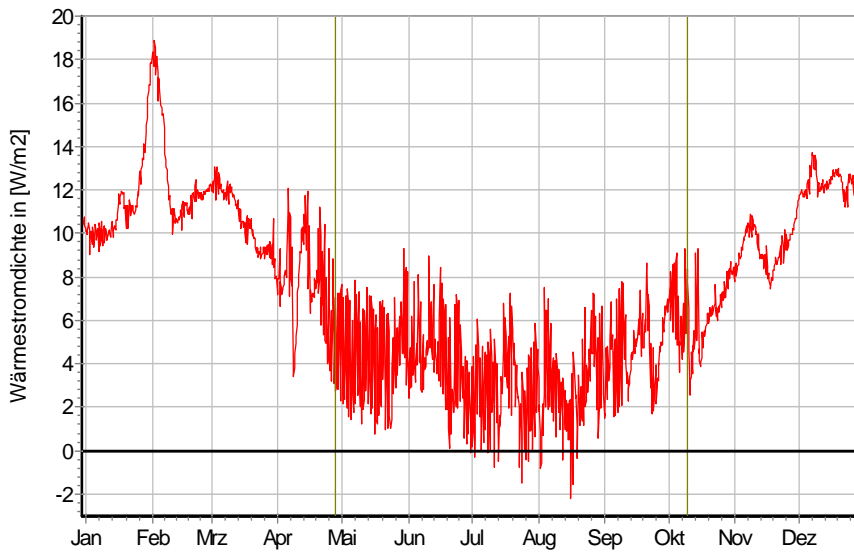
Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,446	12,397	14,734	15,479
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	2,116	3,526	3,995



3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

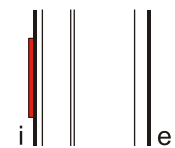
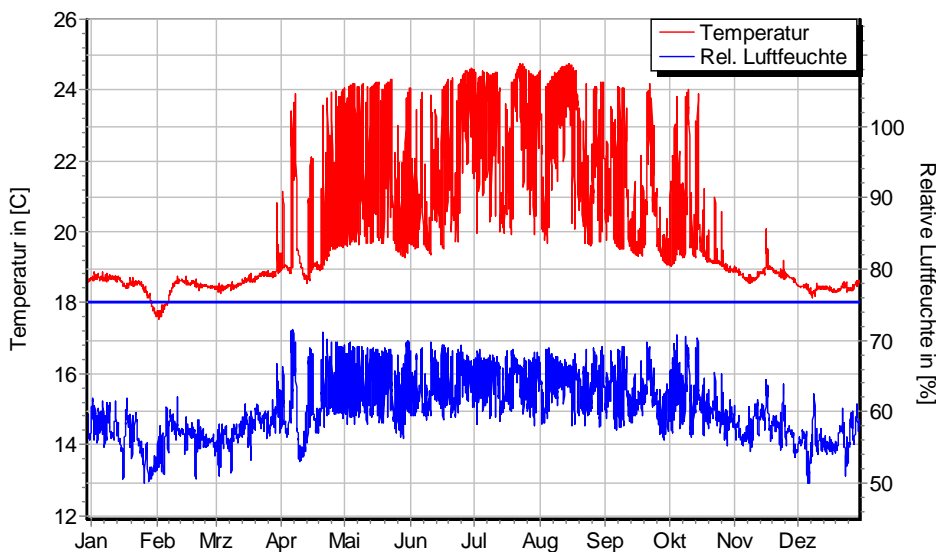


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	22,02	10,46	6,89	5,87
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,03	0,59	0,39	0,33
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,80	1,51	2,38	2,83

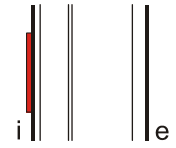
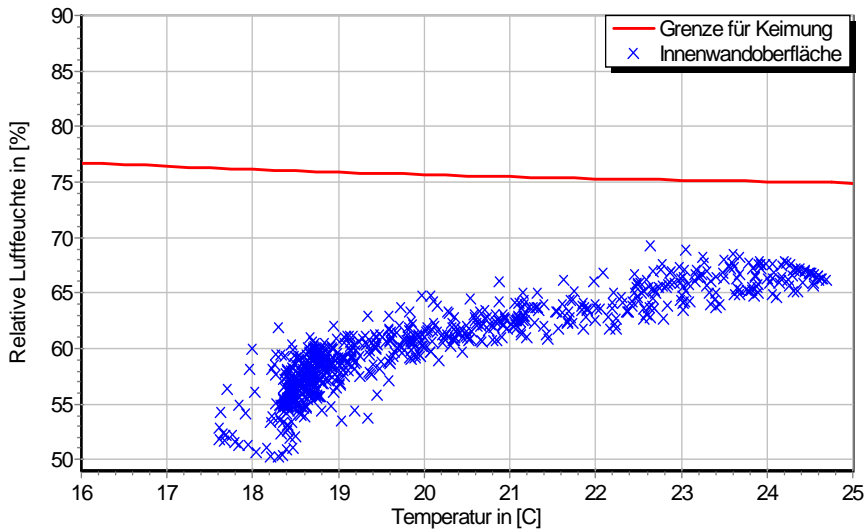
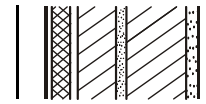
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,73	10,46	7,03	6,05
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,02	0,59	0,40	0,34
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,81	1,51	2,33	2,74

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

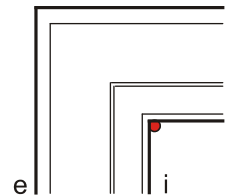
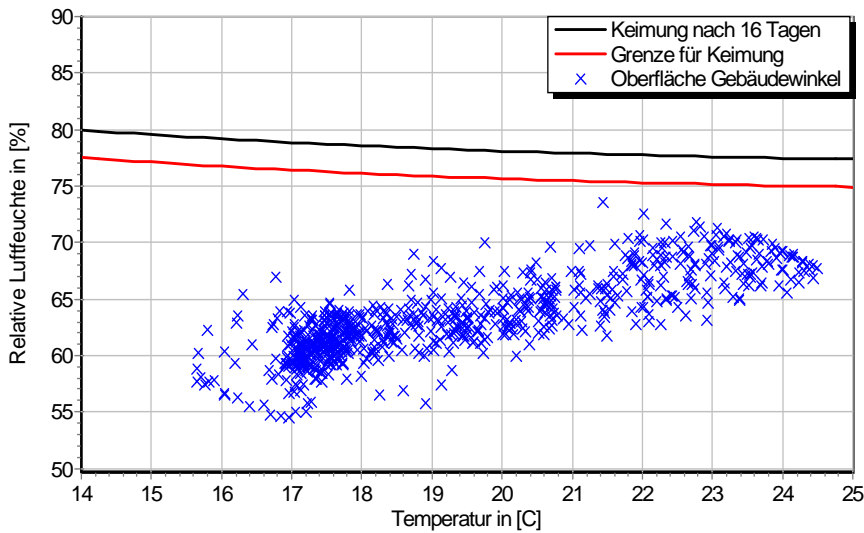


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten

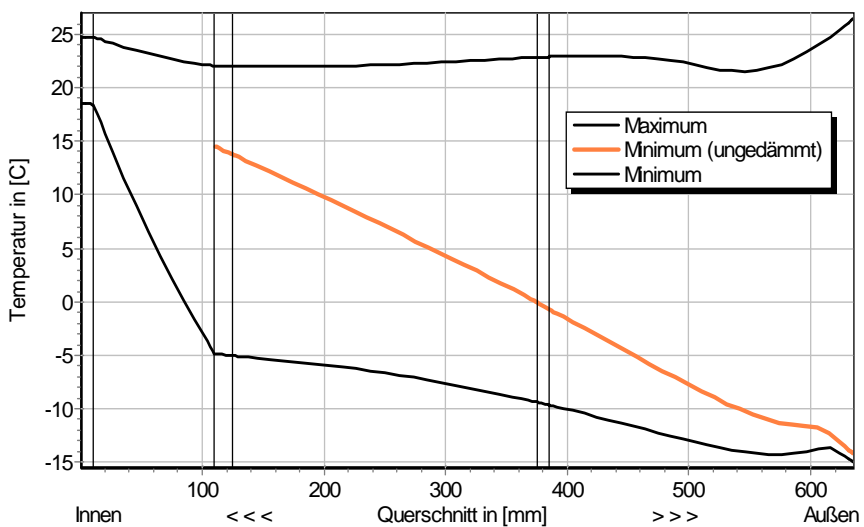


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)
 (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

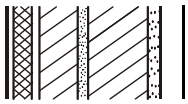


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

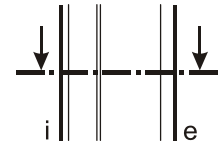
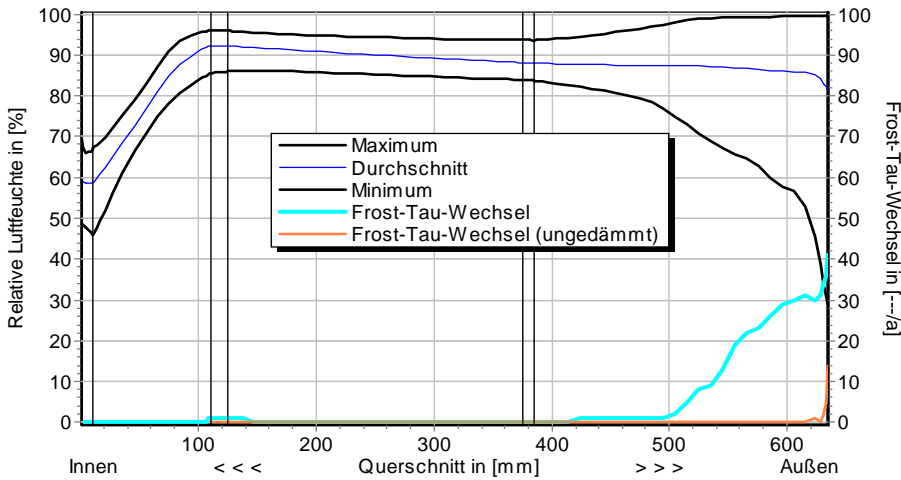
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



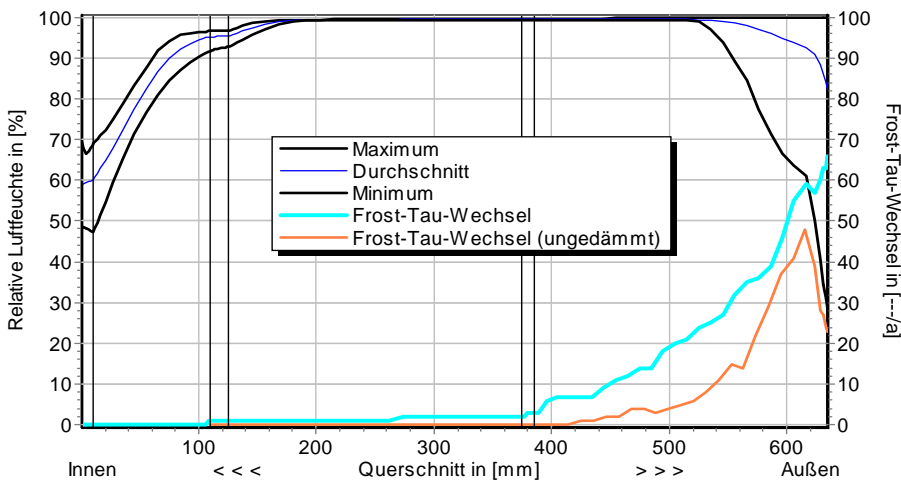
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)
 (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

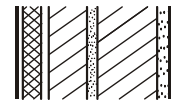


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	38	44	46
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,9	95,5	95,3
	WL_w	%	100	119,7	123,6	122,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,5	97,8	97,8
	CIL_φ	%	100	95,2	93,4	92,8
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	63	69	70
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,2	96,8	96,7
	WL_w	%	100	111,3	113,8	114,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,4	97,0	97,1
	CIL_φ	%	100	97,5	95,5	94,9

3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

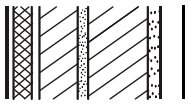
8 Schlussfolgerungen

- DIN: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- COND: In allen gedämmten Konstruktion entstehen zu hohe Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist bei allen gedämmten Wandaufbauten gegeben. Von jedem Aufbau wird ohne Schlagregeneinwirkung der maximal erlaubte massebezogene Feuchtegehalt eingehalten, mit Schlagregen jedoch nie. Das Tauwasser verdunstet ohne Schlagregen immer, mit Regenbelastung dagegen nicht. Schimmelwachstum im Gebäudewinkel ist jeweils nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

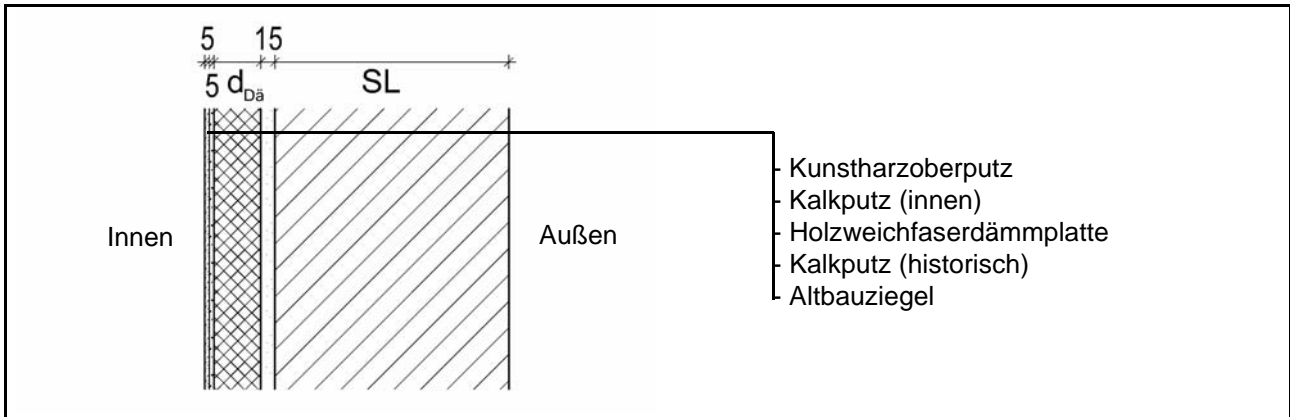
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.3



3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 80, 100 \text{ mm}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kunstharzoberputz	1100	0,70	350	1,0	11,1	0,002
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzweichfaserdämmplatte	180	0,045	5	2,4	31,2	0,016
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

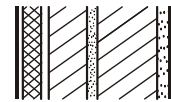
	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,23	2,29	2,89
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,71	0,41	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,182	0,238	0,235
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,571	0,456	0,400
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,757	0,839	0,863

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,23	2,29	2,89
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,71	0,41	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,136	0,152	0,126
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,571	0,454	0,398
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	59,5	55,2	54,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	2,01	2,21	2,31
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,90	1,76	2,24
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,0	16,2	13,0

3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz



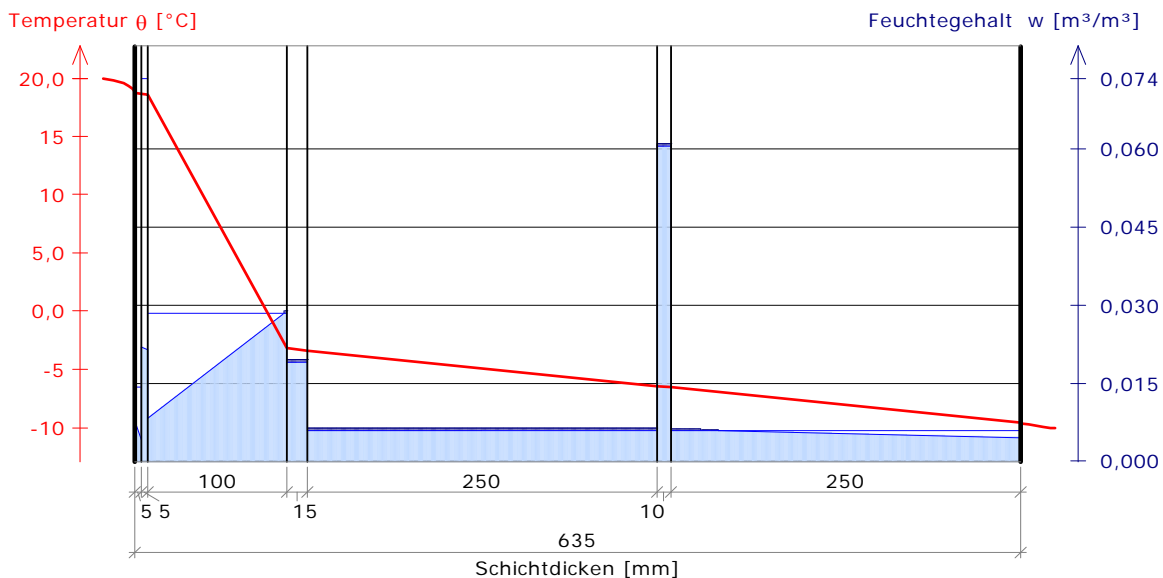
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

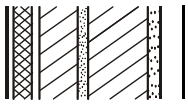
	Bedingung	Unsaniert, 1SL		40mm, 1SL		80mm, 1½SL		100mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen (SL)

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kunstharzoberputz	18,7	2160	1169	0,008		
				0,004		
2 Kalkputz (innen)	18,7	2151	639	0,022		
				0,021		
3 HWFDP-Funktionsschicht	18,6	2142	622	0,008		
				0,029	0,0	0,00
4 Kalkputz (historisch)	-3,2	469	469	0,019	15,0	0,01
				0,019		
5 Altbauziegel	-3,4	462	462	0,006	250,0	0,11
				0,006		
6 Lehmörtel (hist.)	-6,4	356	356	0,061	10,0	0,00
				0,061		
7 Altbauziegel	-6,5	352	352	0,006	33,8	0,01
				0,005		
Luftschicht (Kaltseite)	-9,6	269	208			
	-10	260	208			





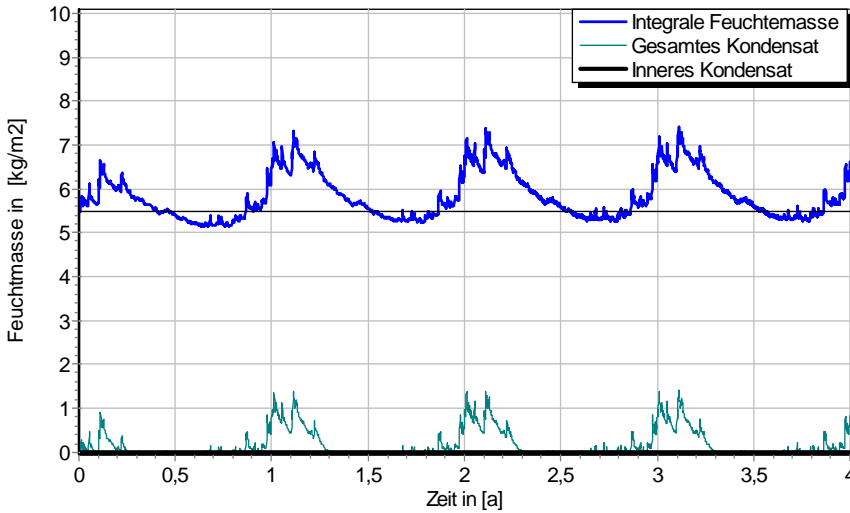
3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

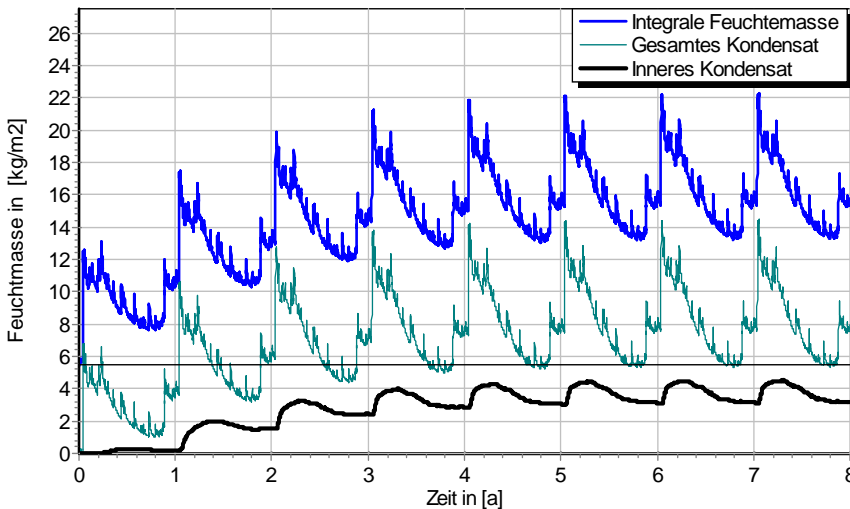


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für
 $d_{Dä} = 100 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	40 mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,673	1,527	1,931
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

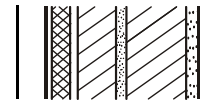


Wassermassen für
 $d_{Dä} = 100 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante (2 SL) in orange

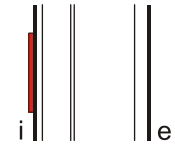
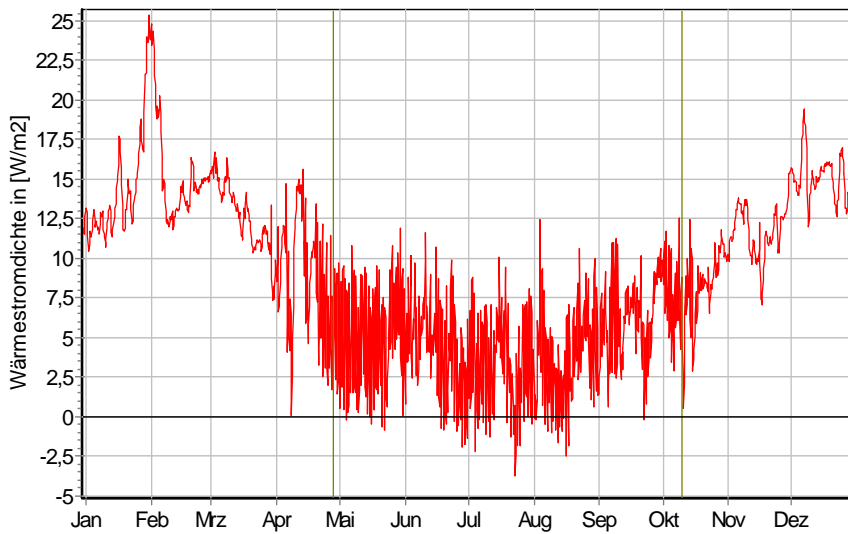
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	40 mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	9,106	13,410	16,763
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	2,157*	2,258*	4,503*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz



5.2 Instationäre Wärmeverluste

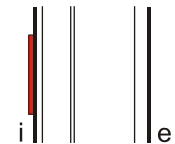
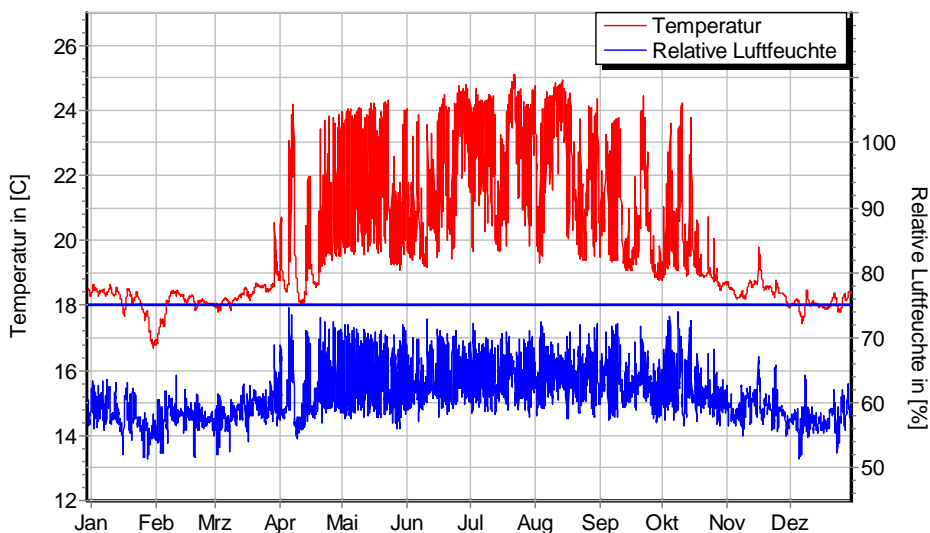


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

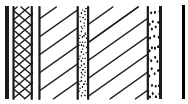
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1 SL	40 mm, 1 SL	80 mm, 1½ SL	100 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	12,39	7,01	5,66
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,53	0,70	0,40	0,32
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	1,25	2,34	2,94

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert, 1 SL	40 mm, 1 SL	80 mm, 1½ SL	100 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	14,13	8,53	6,75
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,52	0,80	0,48	0,38
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	1,07	1,89	2,44

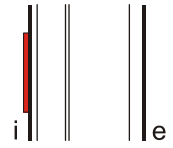
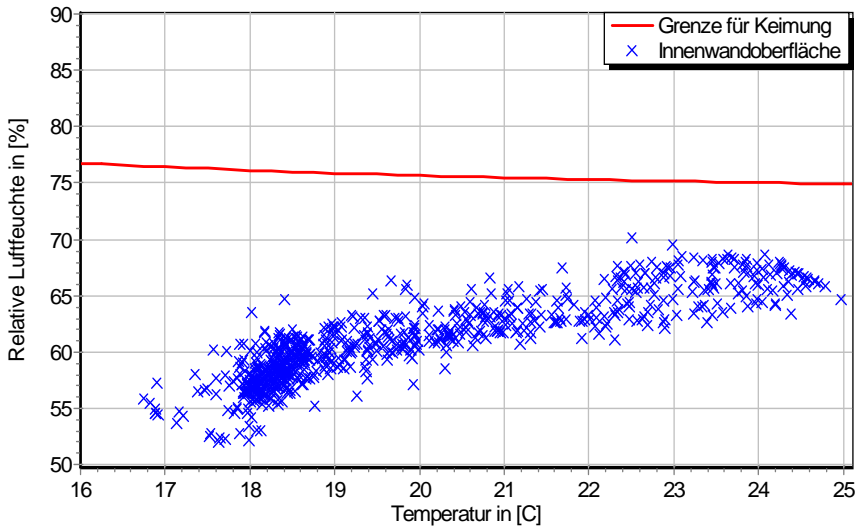
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



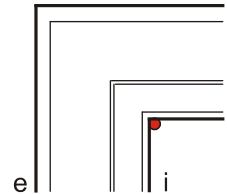
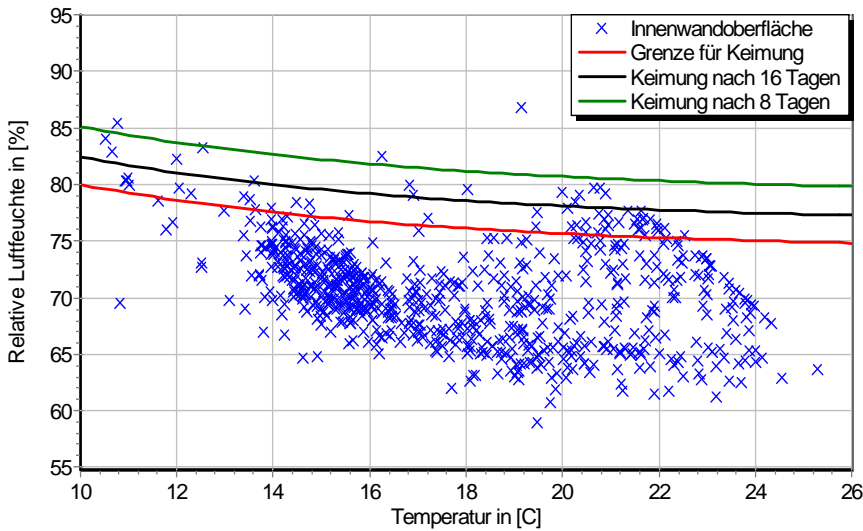
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz

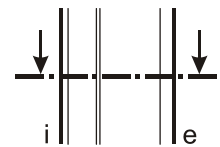
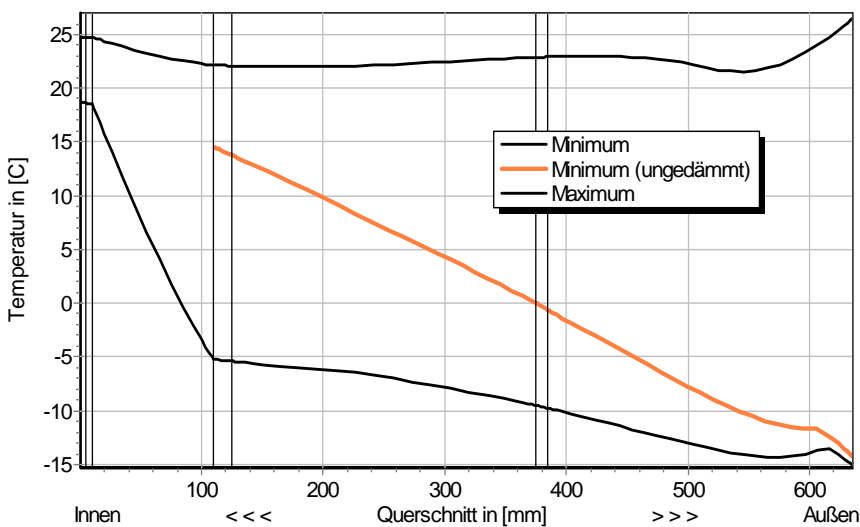


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



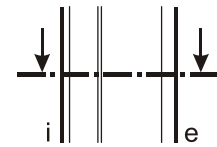
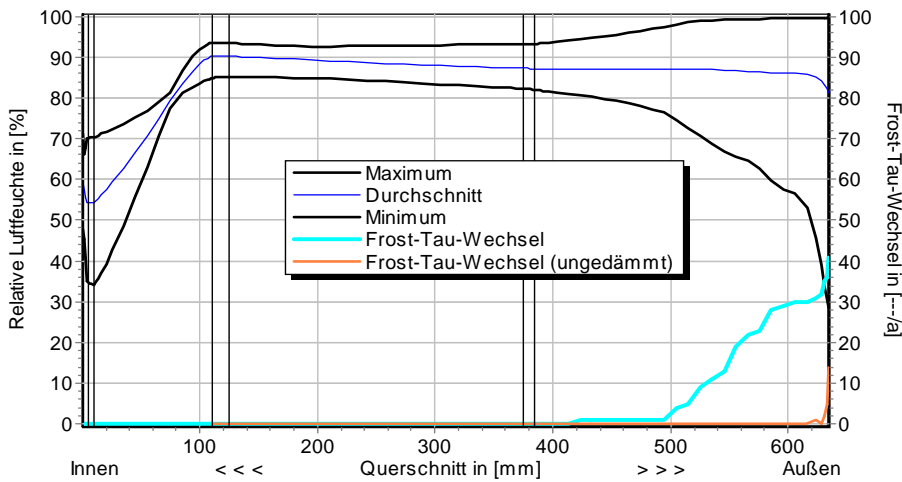
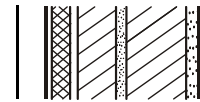
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

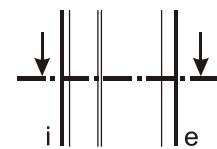
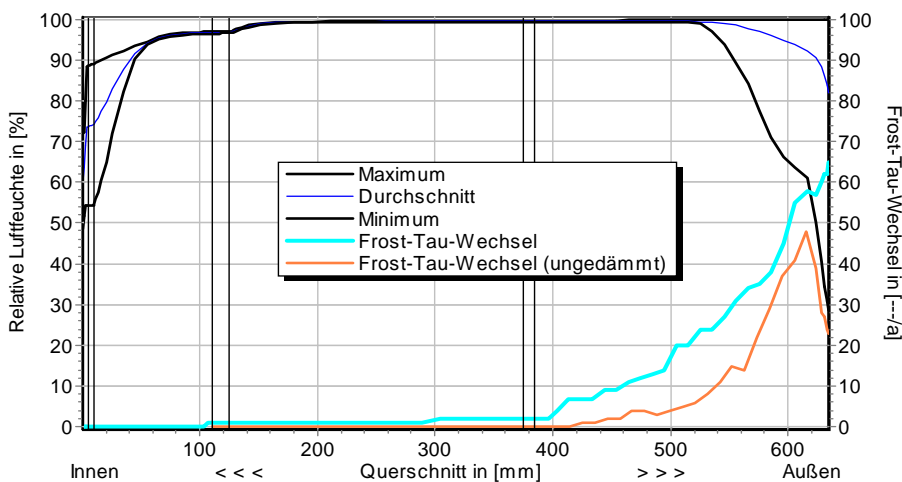


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz



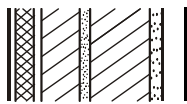
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$ und 2SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$ und 2SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	35	44	46
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,0	94,5	95,3
	WL_w	%	100	114,6	132,2	121,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,4	97,5	98,0
	CIL_φ	%	100	92,8	92,6	92,7
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	57	66	69
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,3	96,2	96,8
	WL_w	%	100	118,4	119,1	113,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	93,4	95,5	97,1
	CIL_φ	%	100	98,8	96,4	95,3



3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$\Delta u_m \leq 3\%$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	40mm,1SL	80mm,1½SL	100mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

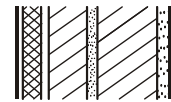
Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird von allen Aufbauten eingehalten. Ohne Schlagregeneinfluss werden auch die restlichen Kriterien nicht überschritten. Mit Schlagregeneinwirkung entstehen bei allen Varianten zu hohe Kondensatmengen bzw. ist die Verdunstung des Kondensats nicht mehr gegeben. Im Gebäudewinkel ist kein Schimmelpilzwachstum zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 80 (1½ SL) und 100 (2 SL) mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

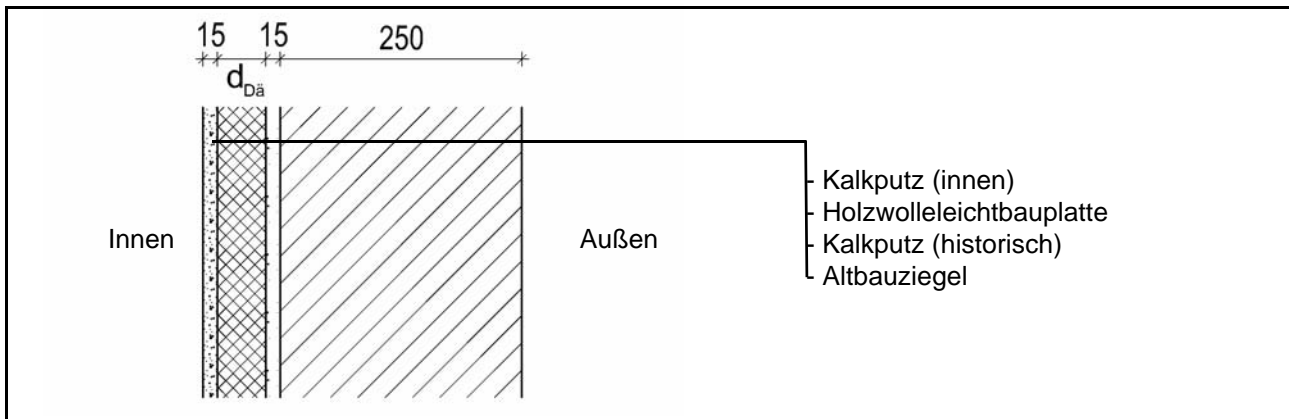
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzwoolleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3

4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 35, 50$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzwoleleichtbauplatte	380	0,08	2,2	4,3	39,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

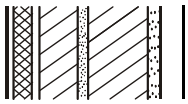
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	0,79	0,98	1,60
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	1,04	0,87	0,56
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,710	1,829	1,695
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,775	2,474	1,844
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,655	0,698	0,779

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	0,79	0,97	1,60
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	1,05	0,87	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,432	1,521	1,395
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,775	2,474	1,844
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	64,6	61,9	57,4
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,28	0,39
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,46	0,65	1,27
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	37,5	33,6	25,5



4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

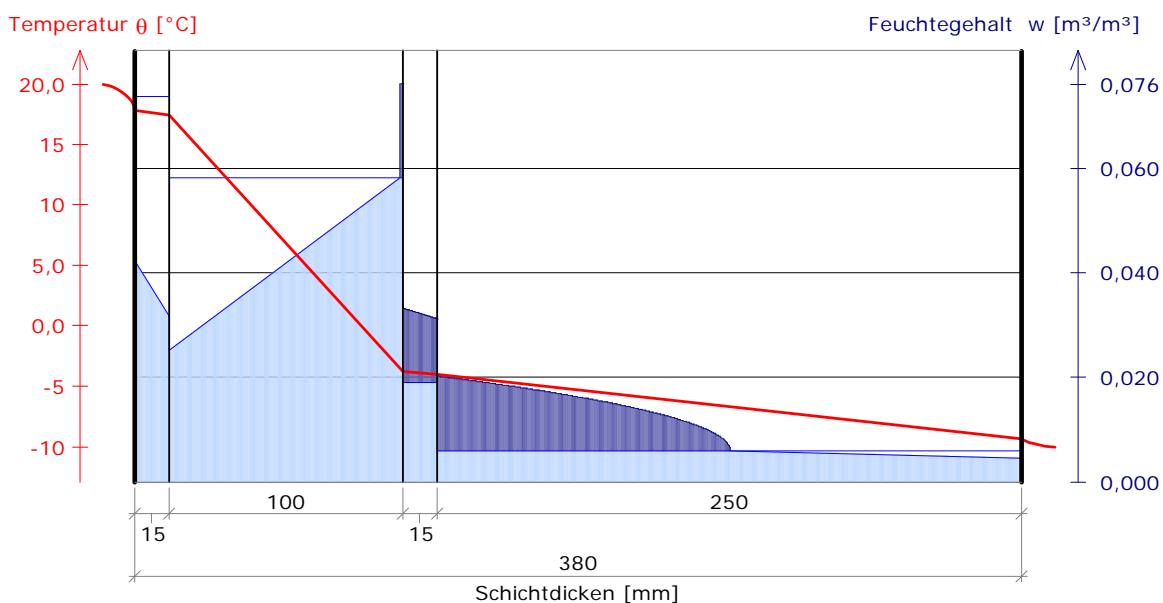
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniert		35 mm		50 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	(✗)	(✗)	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓

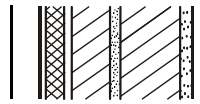
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

	Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
	Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
		17,8	2038	1169			
1	Kalkputz (innen)				0,042		
					0,032		
2	Holzwolleleichtbauplatte	17,5	1995	860	0,022		
					0,069	0,0	0,00
3	Kalkputz (historisch)	-3,7	447	447	0,033	15,0	0,20
					0,031		
4	Altbauziegel	-4,0	436	436	0,020	125,5	1,20
					0,004		
	Luftschicht (Kaltseite)	-9,3	276	208			
		-10	260	208			



4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

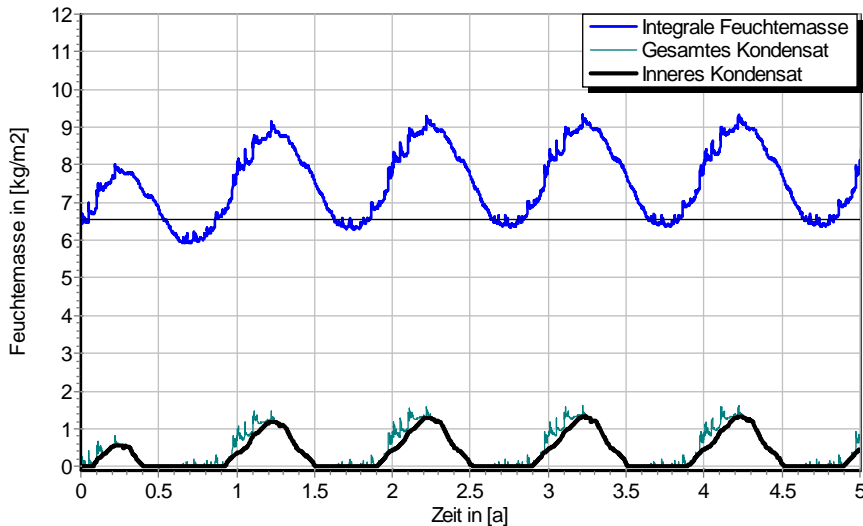


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



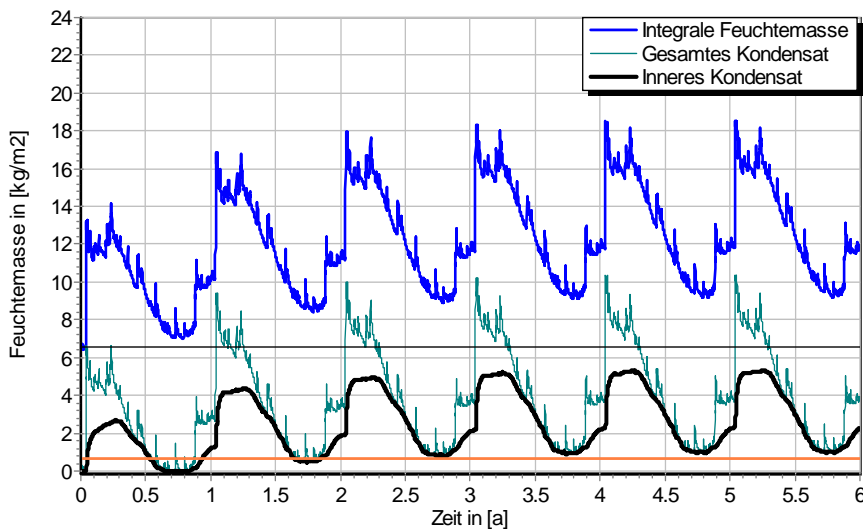
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	1,445	1,964	2,743
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,616	0,917	1,321

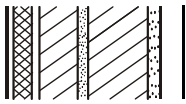


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

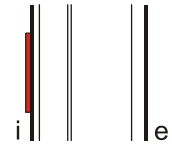
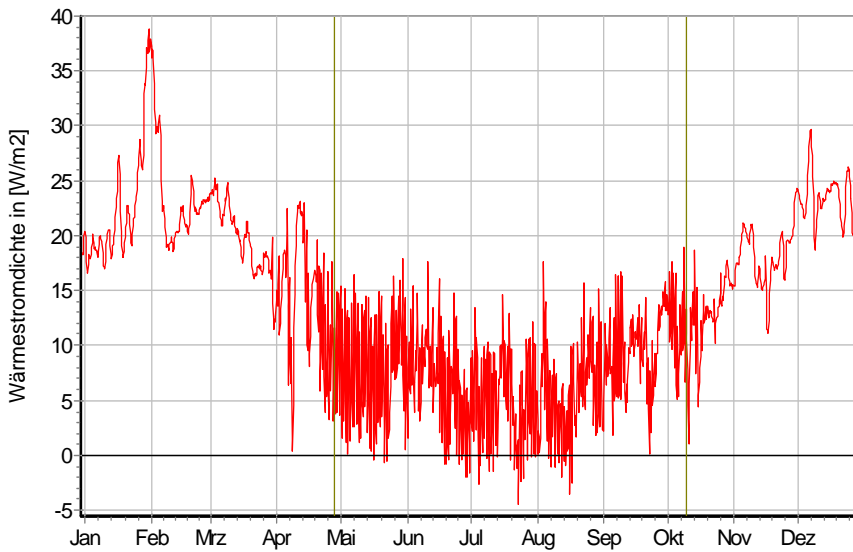
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	8,247	8,834	11,968
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	1,968*	2,484*	4,675*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

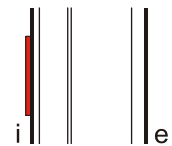
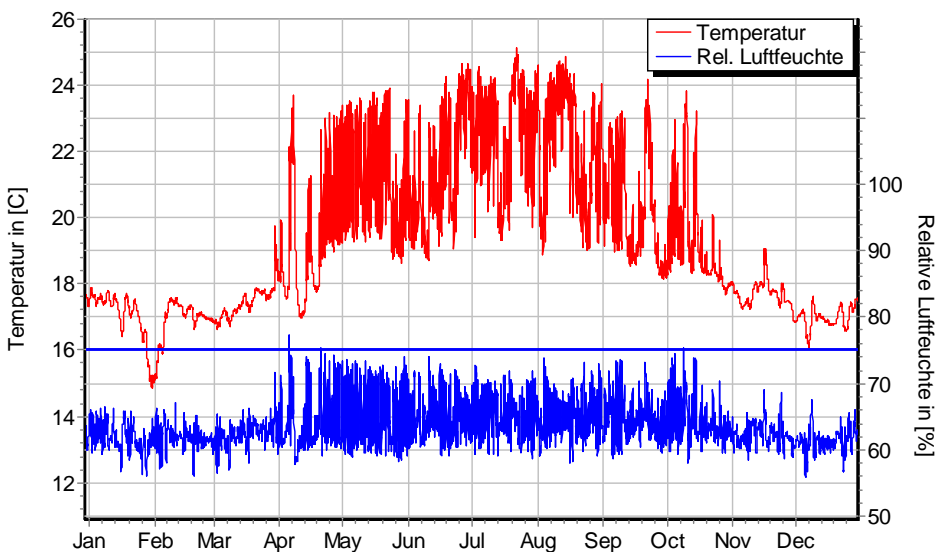


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	19,25	16,07	10,30
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,07	1,09	0,91	0,59
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,31	0,74	0,92	1,54

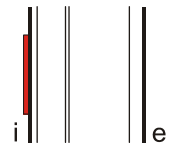
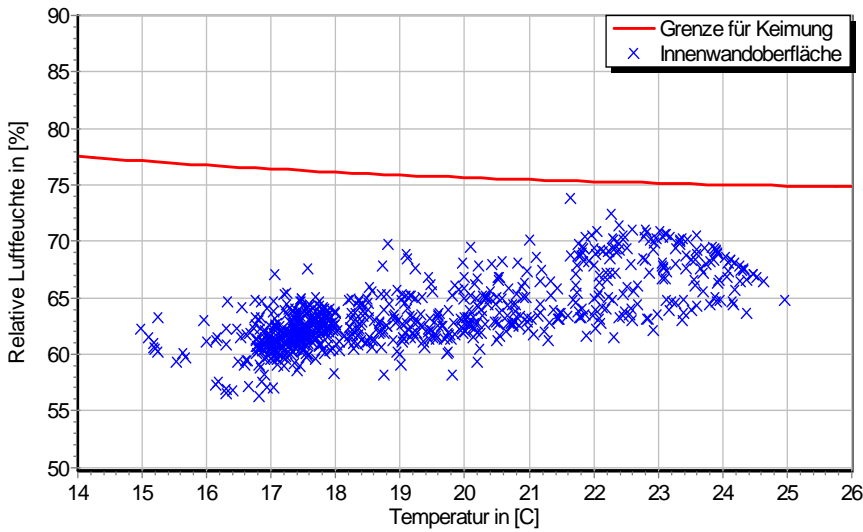
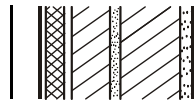
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	19,17	16,06	10,94
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,05	1,09	0,91	0,62
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,32	0,75	0,93	1,44

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

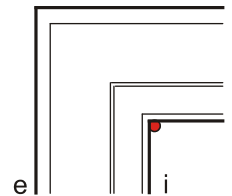
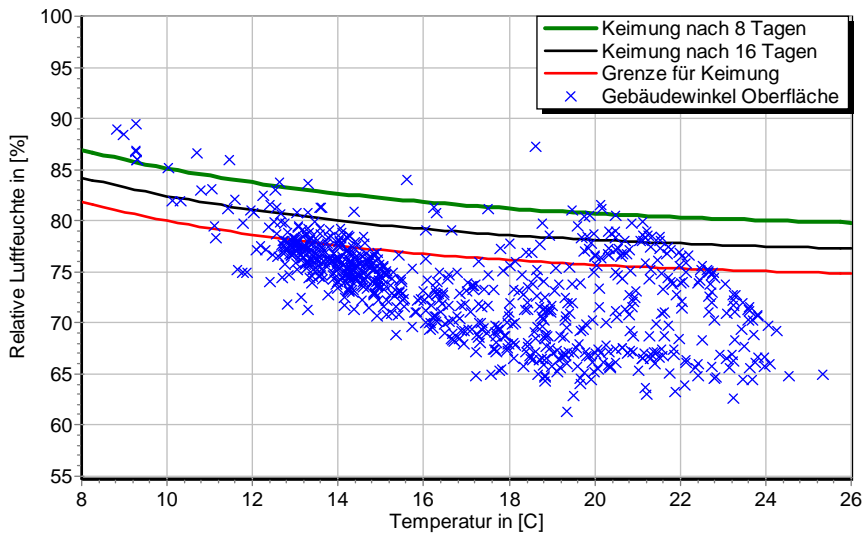


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

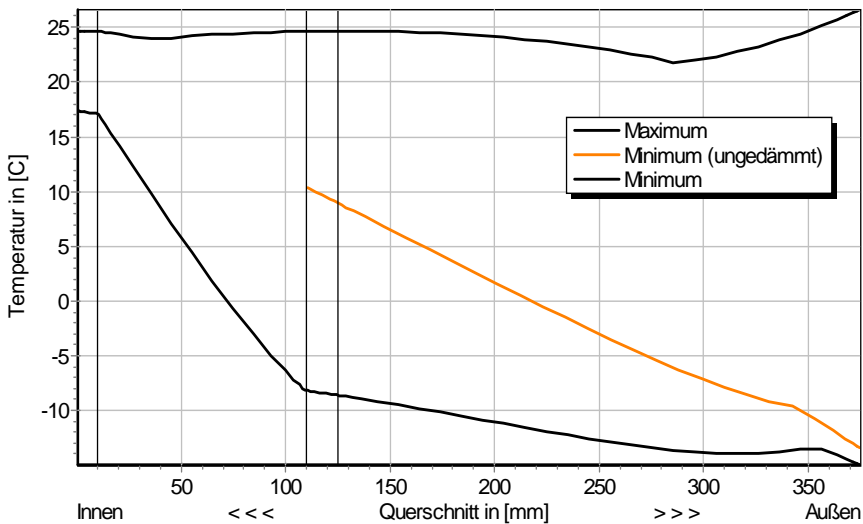


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)
 (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

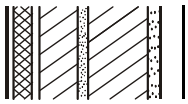


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

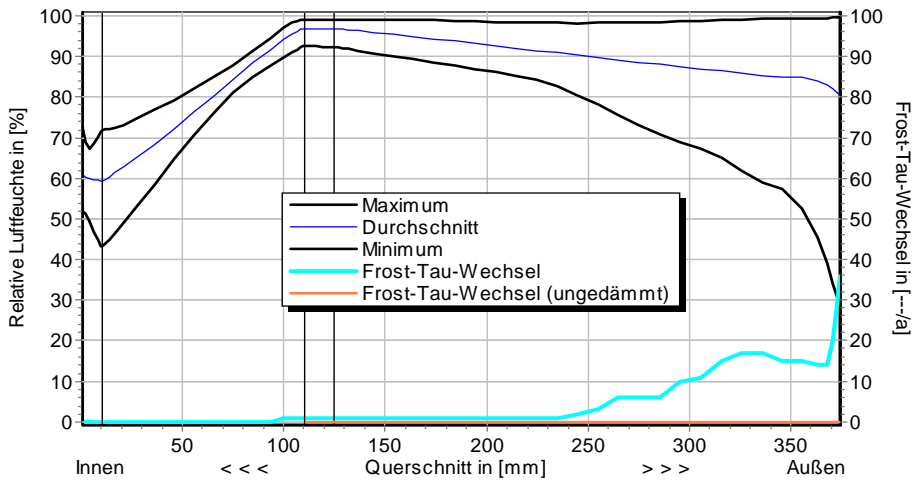
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



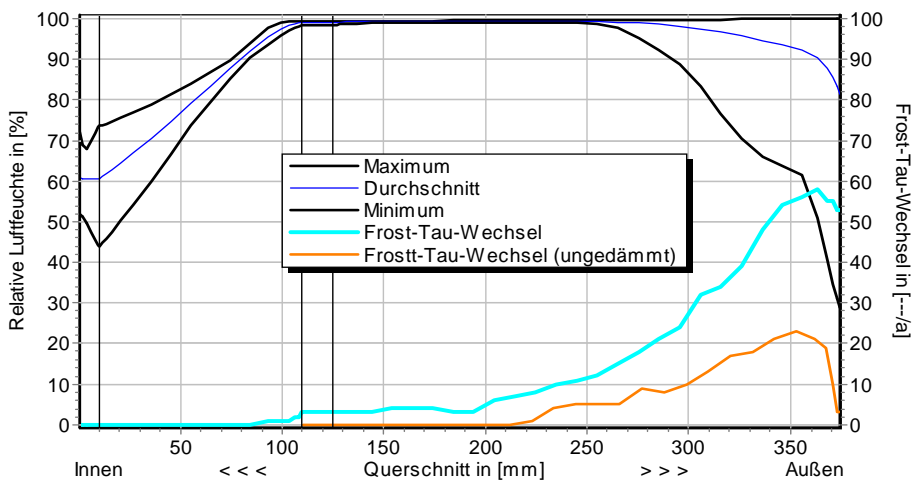
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)
 (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

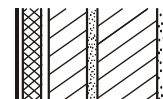


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	91/82	153/107	201/123
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	22	27	38
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	95,0	94,6	93,9
	WL_w	%	100	99,9	106,6	119,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	94,7	94,5	94,3
	CIL_{φ}	%	100	96,6	95,5	92,4
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	162/121	196/150	365/365
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	48,1	54	63
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	96,0	95,7	95,0
	WL_w	%	100	113,2	116,9	122,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	94,4	93,8	92,6
	CIL_{φ}	%	100	100,2	99,7	98,7

4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	(✗)	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	✗	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

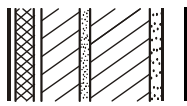
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Bis einschließlich 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten, die Kondensatmengen sind bei allen Dämmvarianten zu hoch.
- COND: Bis einschließlich 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten, die Kondensatmengen sind bei allen Dämmvarianten zu hoch.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist erst mit 100 mm gegeben. Mit 35 und 50 mm wird die maximale innere Kondensatmenge beziehungsweise der erlaubte massebezogene Feuchtegehalt für Holzwerkstoffe eingehalten. Der Aufbau mit 35 mm dicken HWL-Platten ist von dieser Bewertung ausgenommen (*DIN 4108-3 Abs. 4.3.2.2*). Mit Schlagregen ist die Verdunstung mit 100 mm Dämmung nicht gewährleistet. Ausreichender Schutz gegen Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel besteht erst mit 100 mm Dämmung.

Vorzugsvarianten: keine

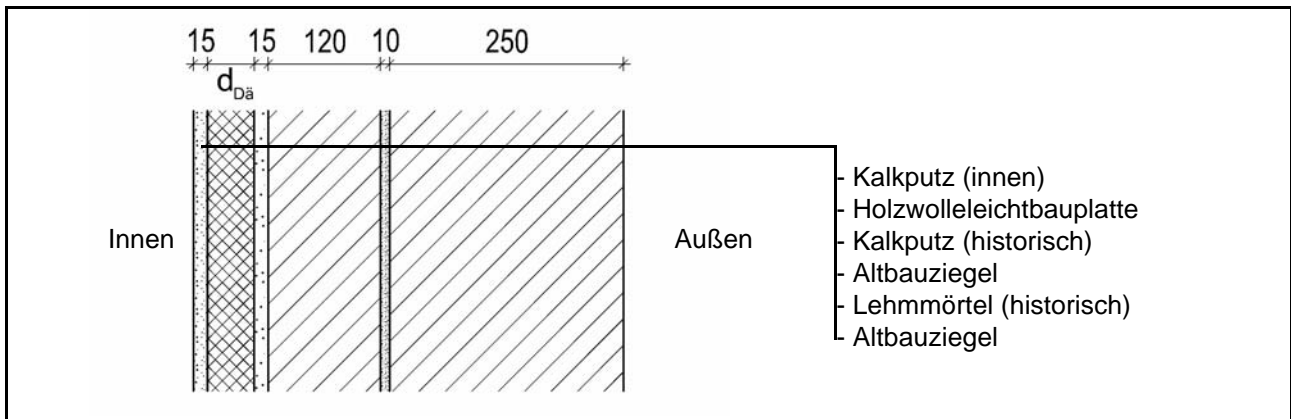
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1



4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 35, 50$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzwolleleichtbauplatte	380	0,08	2,2	4,3	39,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

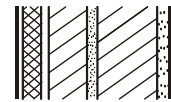
	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,49	0,95	1,14	1,77
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,51	0,89	0,76	0,52
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,166	1,427	1,498
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,784	2,483	1,756
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,528	0,685	0,720	0,790

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,49	0,95	1,14	1,76
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,51	0,89	0,77	0,52
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,030	1,256	1,293
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,784	2,483	1,755
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	72,5	62,2	60,3	56,7
Innendämmsystem: ** feuchteabhängig						
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,28	0,39
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,46	0,65	1,27
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	37,5	33,6	25,5

4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten



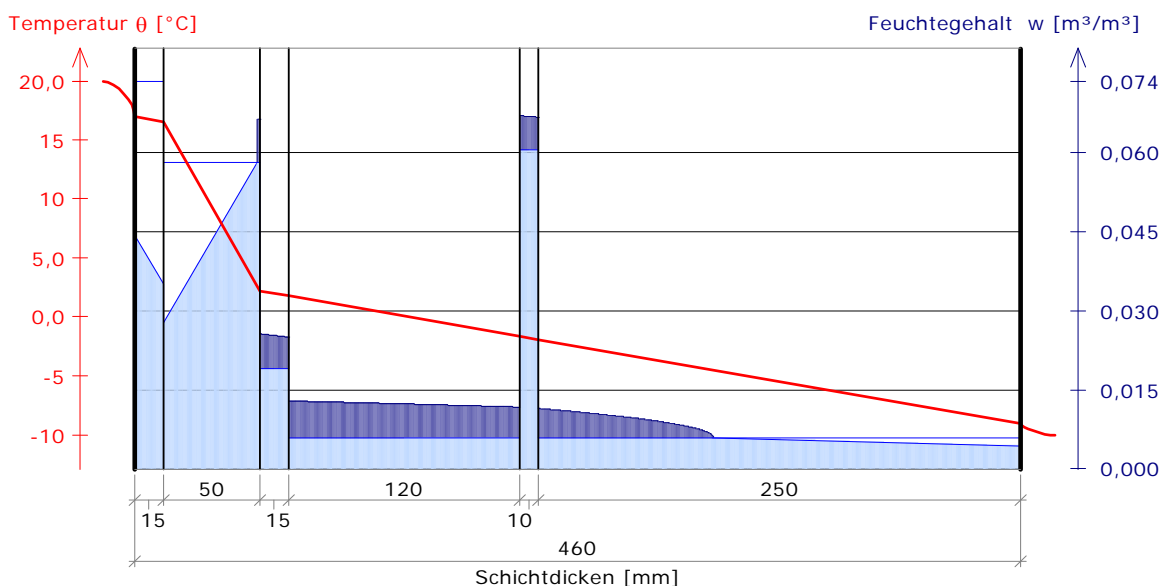
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

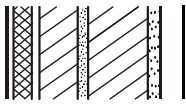
	Bedingung	Unsaniiert		35 mm		50 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	(✗)	(✗)	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,0	2062	1169	0,042		
	2 Holzwolleleichtbauplatte	17,7	2022	895	0,033	
3 Kalkputz (historisch)		-1,7	530	530	0,023	0,0
4 Altbauziegel	-2,0	518	518	0,060	15,0	0,10
				0,026	120,0	0,79
5 Lehmörtel (historisch)	-4,3	426	426	0,025	10,0	0,06
				0,013	91,2	0,35
6 Altbauziegel	-4,5	418	418	0,012		
				0,067		
Luftschicht (Kaltseite)	-9,4	275	208	0,012		
	-10	260	208	0,004		





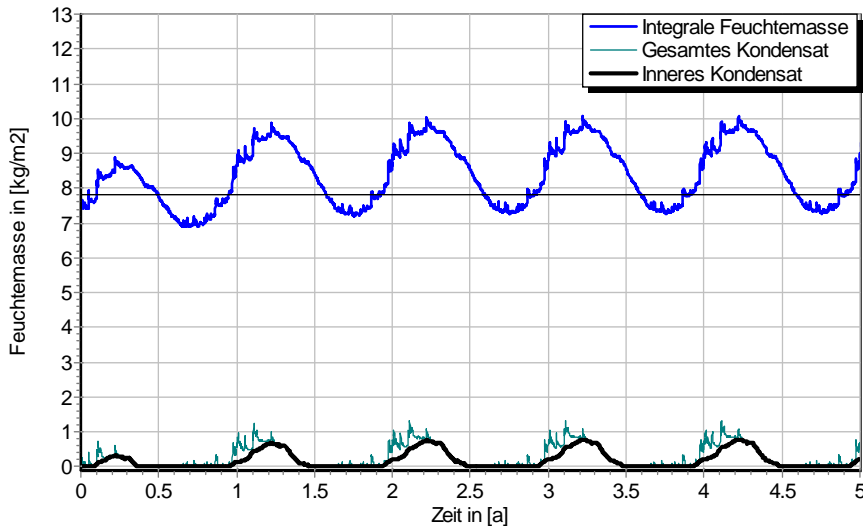
4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



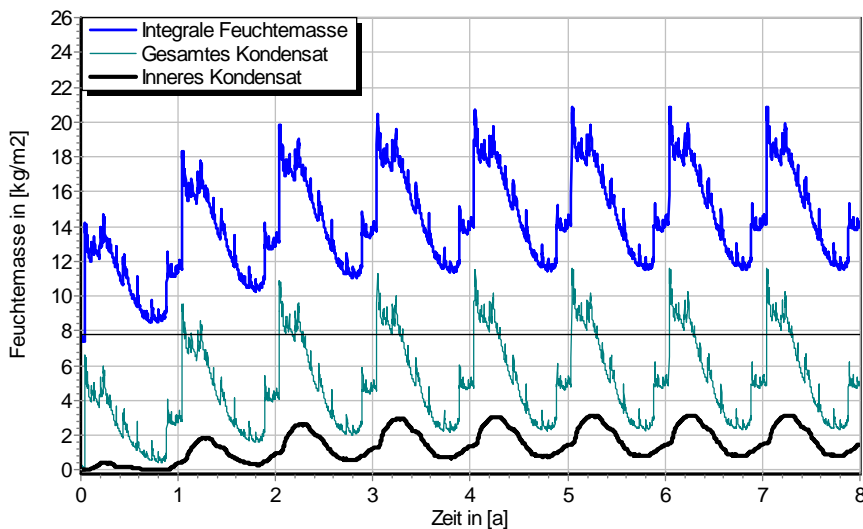
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,350	0,937	1,497	2,488
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,056	0,316	0,771

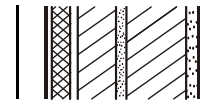


$\Delta m_{W,80}$

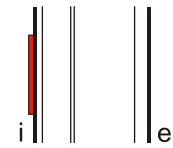
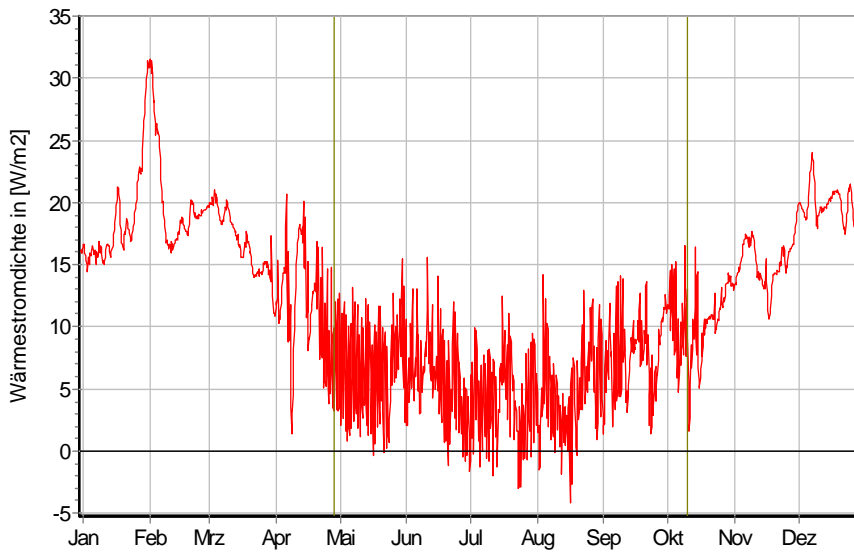
Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,927	8,759	9,987	13,302
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,344	1,126	3,167

4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

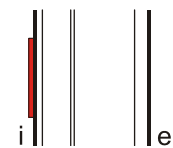
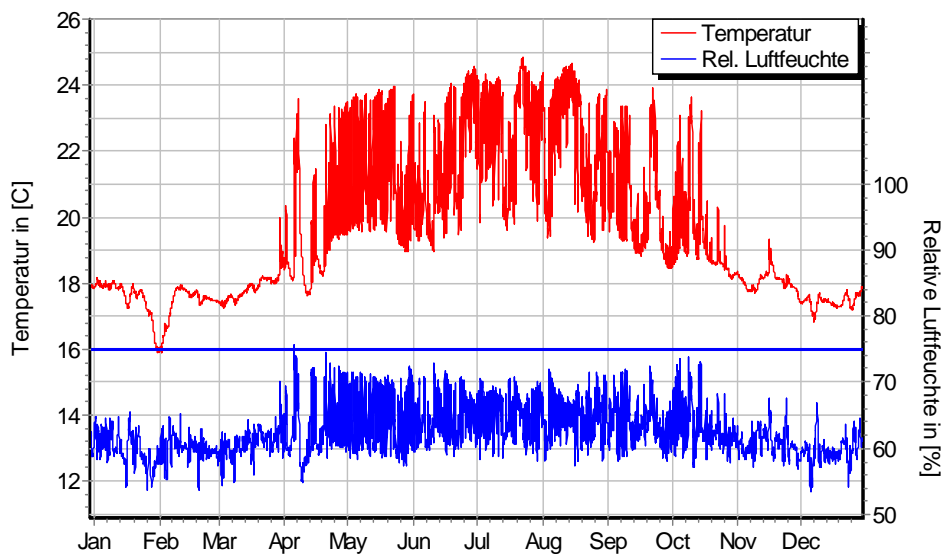


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

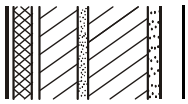
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,42	16,15	13,80	9,31
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,56	0,92	0,78	0,53
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,47	0,92	1,10	1,72

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,08	16,03	13,76	9,56
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,54	0,91	0,78	0,54
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,48	0,93	1,11	1,67

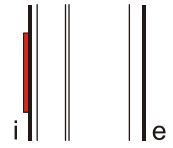
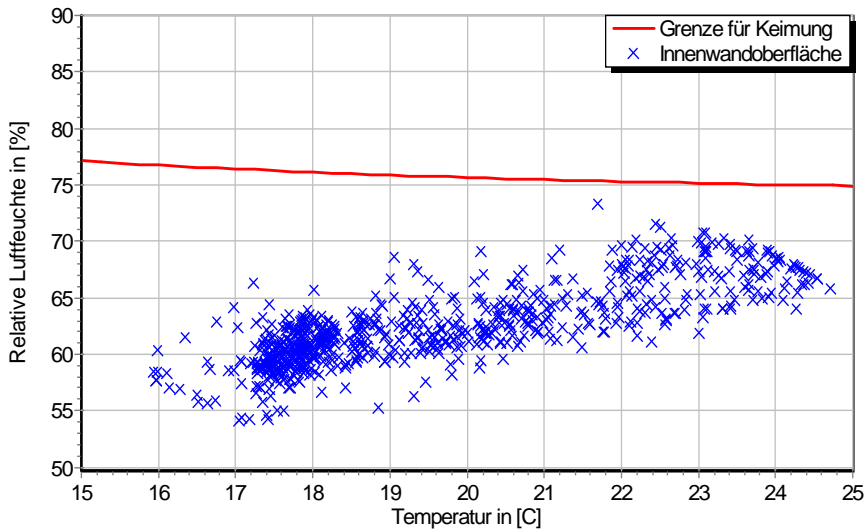
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



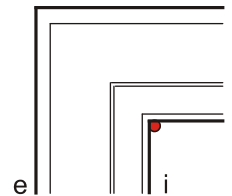
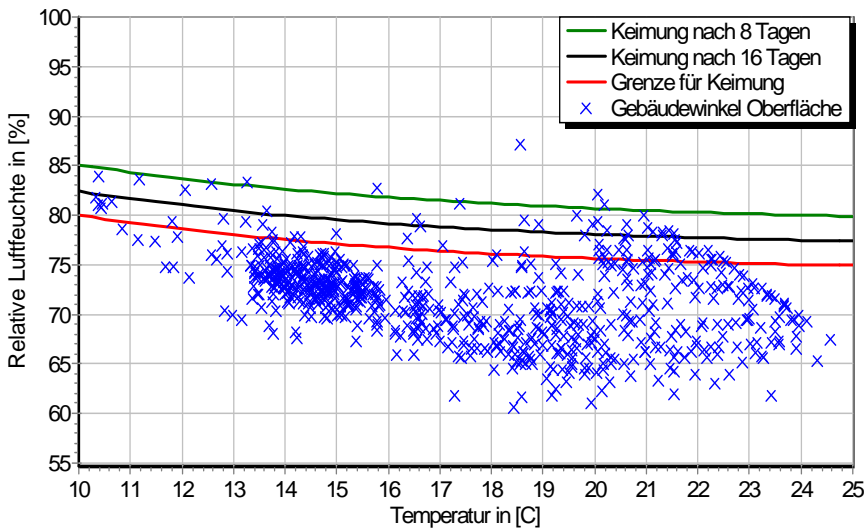
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

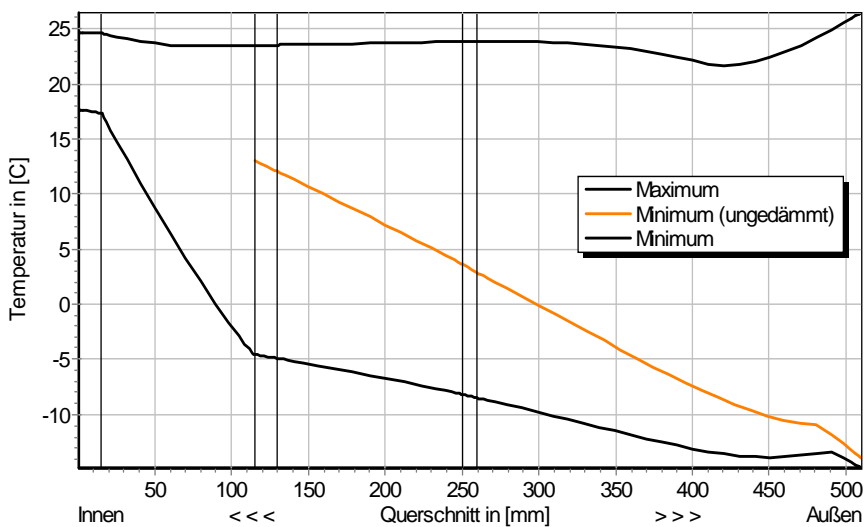


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



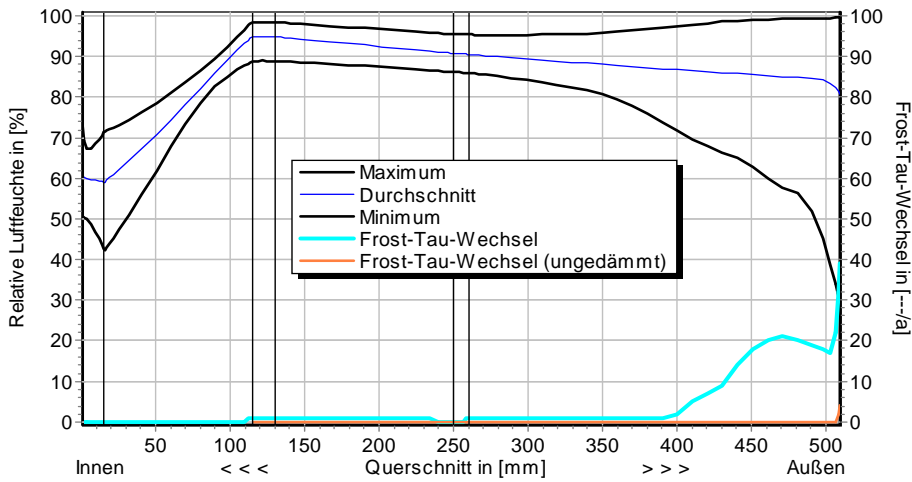
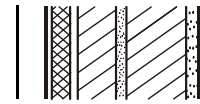
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

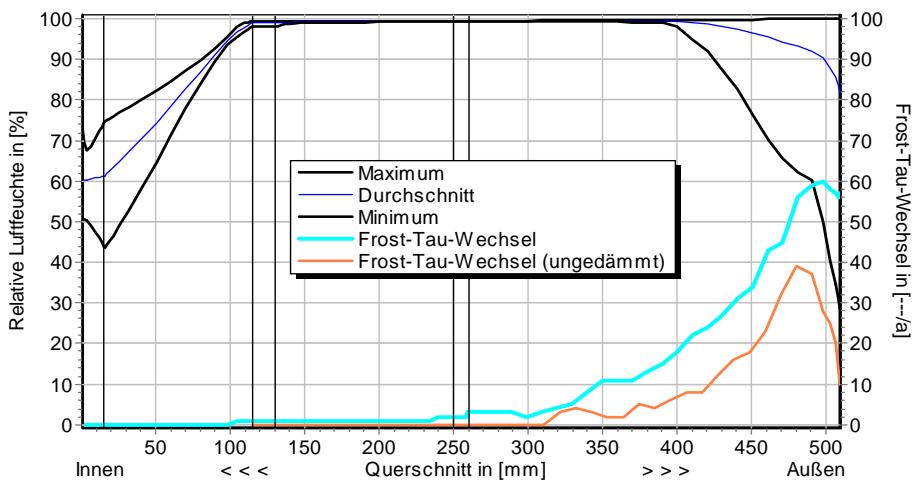


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten



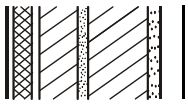
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	75/64	172/130
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	10	27	31	40
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	88,4	88,1	87,5
	WL_w	%	100	111,5	116,9	126,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,8	97,0	97,3
	CIL_φ	%	100	97,1	96,0	94,1
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	119/88	355/304
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	39	54	58	65
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	89,4	89,0	88,4
	WL_w	%	100	112,0	114,1	118,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,6	96,4	95,9
	CIL_φ	%	100	99,3	98,9	97,4



4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	(✓)	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	(✓)	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

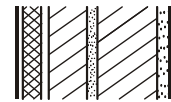
- DIN: Bis einschließlich 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten, die Kondensatmengen sind bei allen Dämmvarianten zu hoch.
- COND: Bis einschließlich 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten, die Kondensatmengen sind bei allen Dämmvarianten zu hoch.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist erst mit 100 mm gegeben. Ohne Schlagregeneinwirkung wird der maximale massebezogene Feuchtegehalt bei keiner Variante überschritten. Die Tauwassermengen des Aufbaus mit 35 mm Dämmung sind von einer Bewertung ausgenommen (*DIN 4108-3 Abs. 4.3.2.2*). Bei hoher eindringender Schlagregenmenge bilden sich ab 50 mm Dämmung zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung ist nicht gewährleistet. Ausreichender Schutz gegen Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel besteht erst mit 50 mm Dämmung.

Vorzugsvarianten: 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

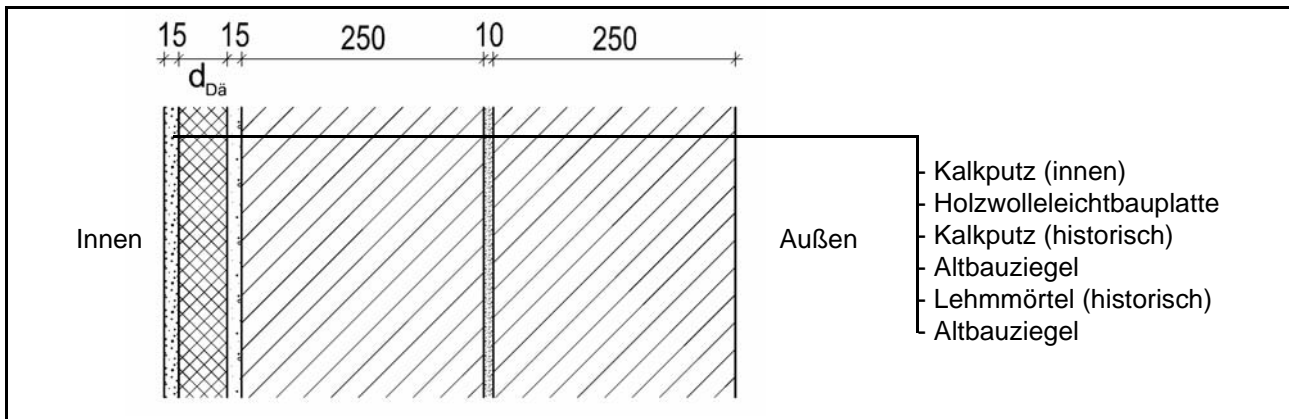
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.2

4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 35, 50$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_W
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Holzwoleleichtbauplatte	380	0,08	2,2	4,3	39,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

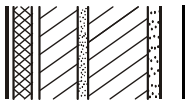
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,66	1,12	1,30	1,93
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,21	0,78	0,68	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,702	1,070	1,304
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,784	2,483	1,712
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,583	0,710	0,739	0,800

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	35 mm	50 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,66	1,11	1,30	1,92
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,21	0,78	0,68	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,600	0,940	1,133
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,784	2,483	1,711
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{Si}	%	66,7	60,5	59,0	56,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,28	0,39
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,46	0,65	1,27
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	37,5	33,6	25,5



4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

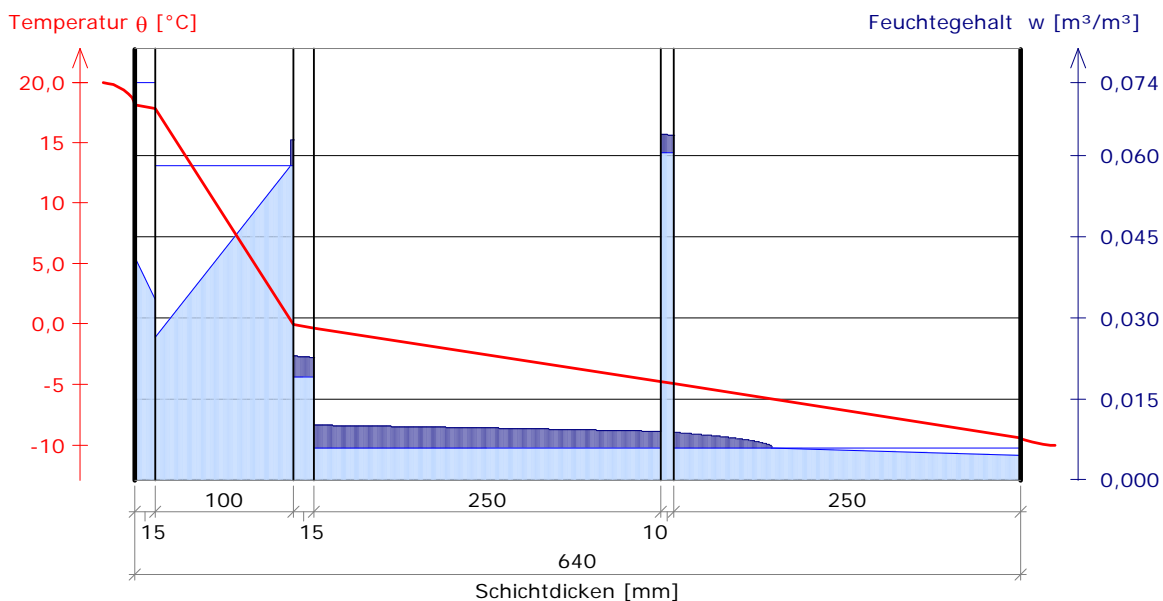
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		35 mm		50 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	(✗)	(✓)	✗	✓	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

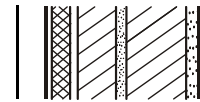
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,1	2082	1169	0,041		
	2 Holzwolleleichtbauplatte	17,9	2045	930	0,033	
3 Kalkputz (historisch)		-0,1	609	609	0,023	0,0
	4 Altbauziegel	-0,3	597	597	0,023	15,0
5 Lehmörtel (historisch)		-4,8	410	410	0,010	250,0
	6 Altbauziegel	-5,0	403	403	0,009	10,0
Luftschicht (Kaltseite)		-9,4	273	208	0,064	71,1
		-10	260	208	0,005	



4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

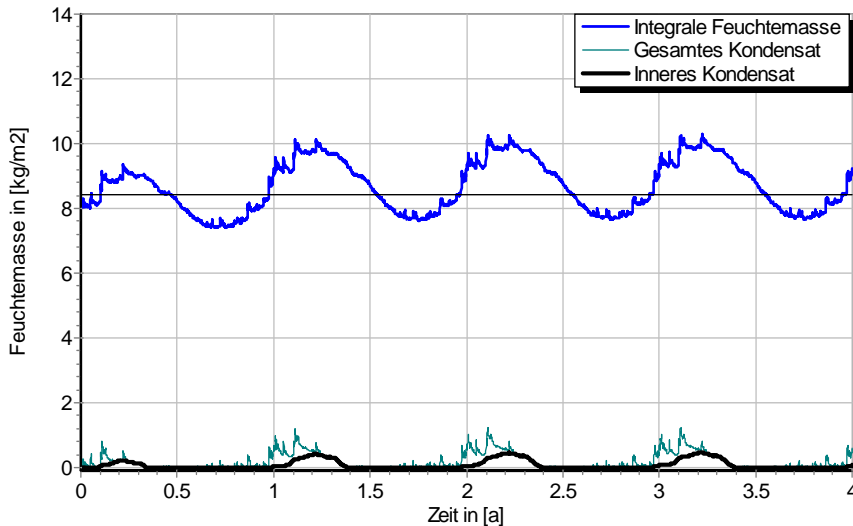


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



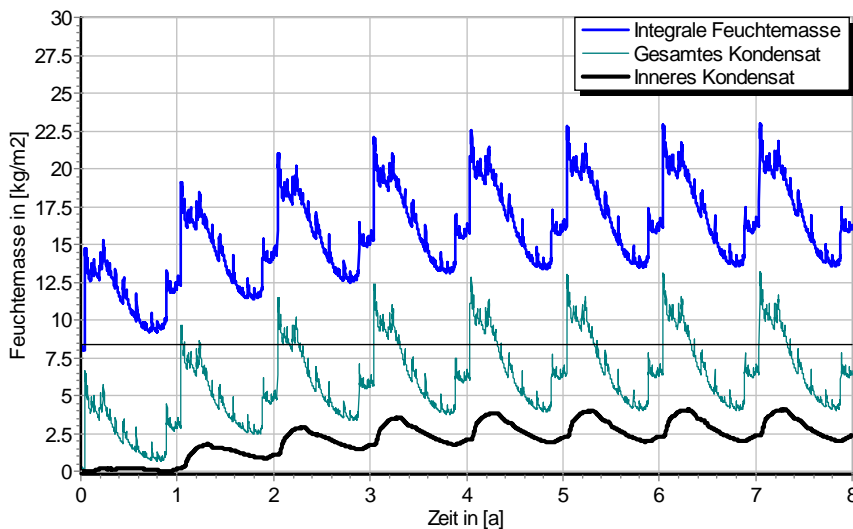
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

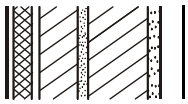
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,434	0,937	1,110	2,080
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,016	0,442



$\Delta m_{W,80}$

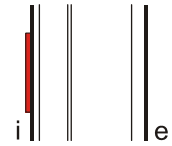
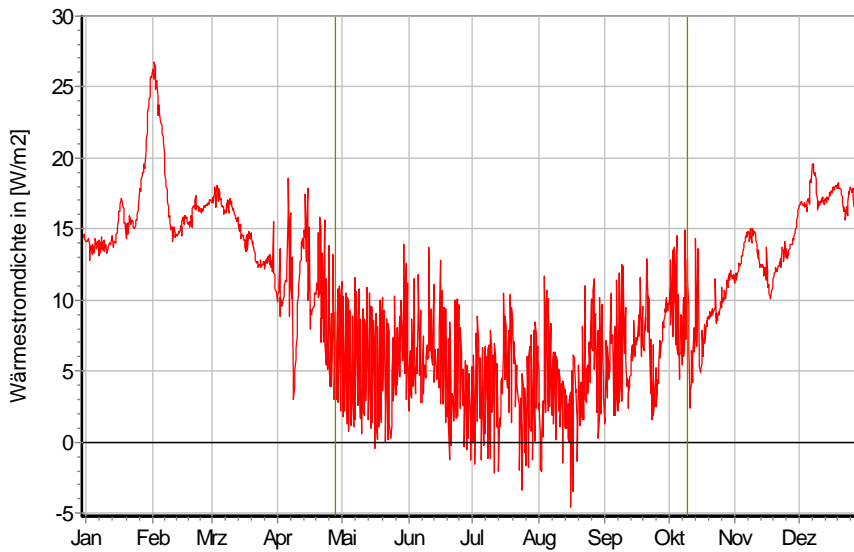
Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	35 mm	50 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,446	10,122	11,457	14,777
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	1,033	1,754	4,131



4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

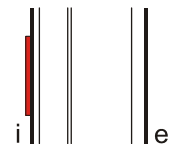
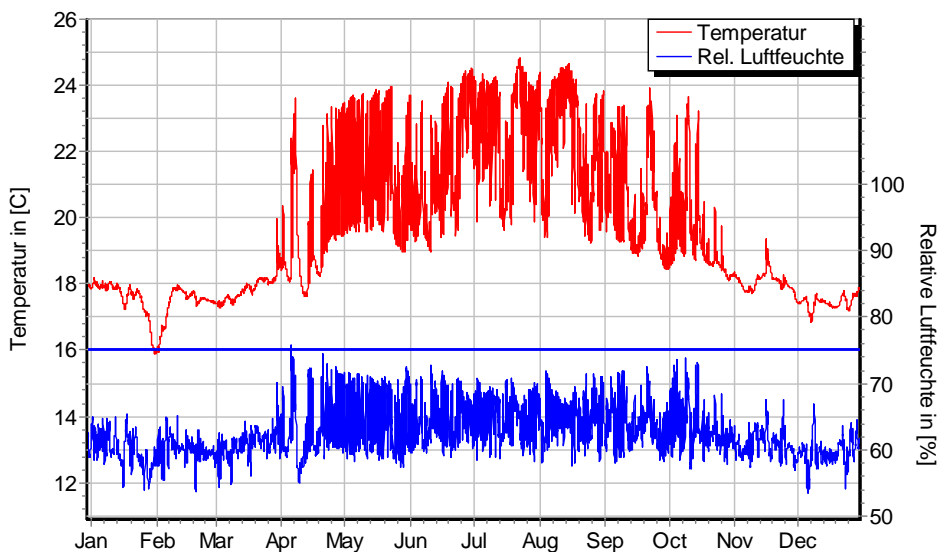


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 35$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	22,02	14,02	12,20	8,51
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,25	0,80	0,69	0,48
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,63	1,08	1,27	1,90

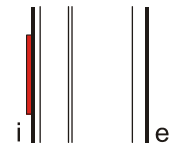
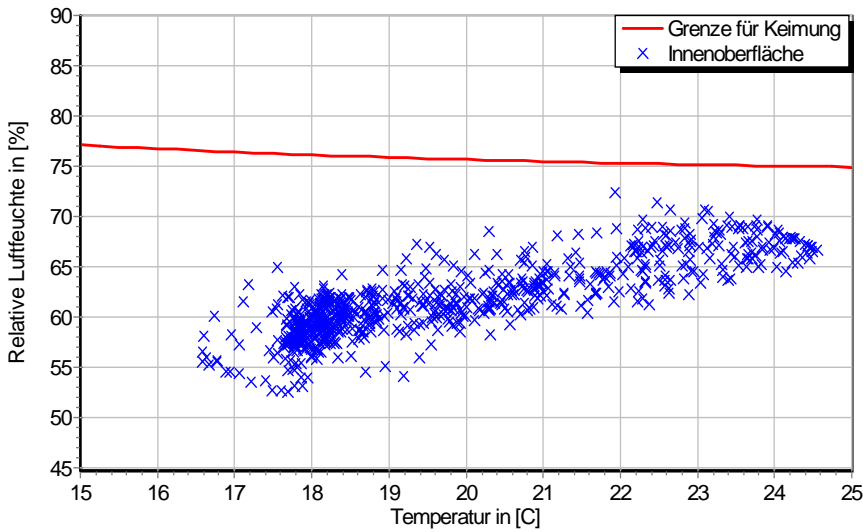
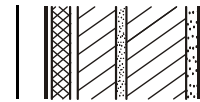
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	35 mm	50 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,73	13,91	12,14	8,60
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,24	0,79	0,69	0,49
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,64	1,09	1,28	1,87

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

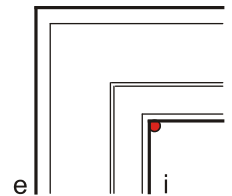
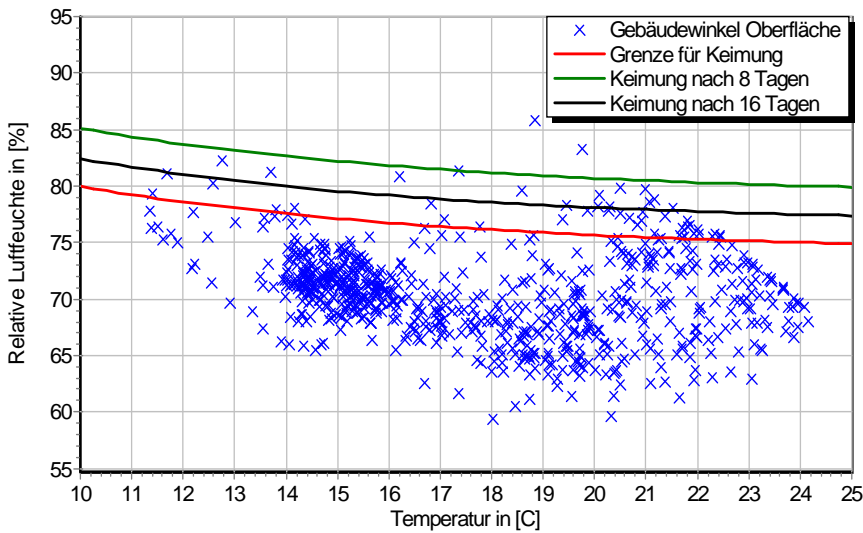


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 35$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten

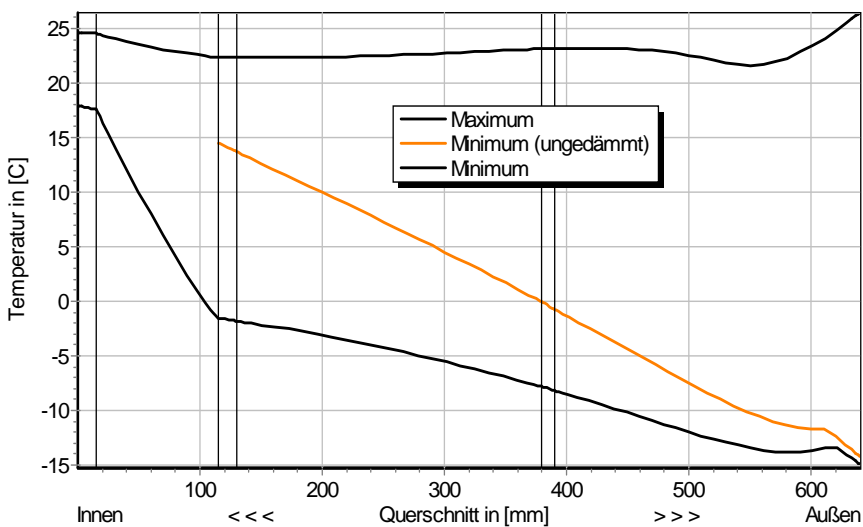


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

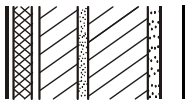


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 35 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

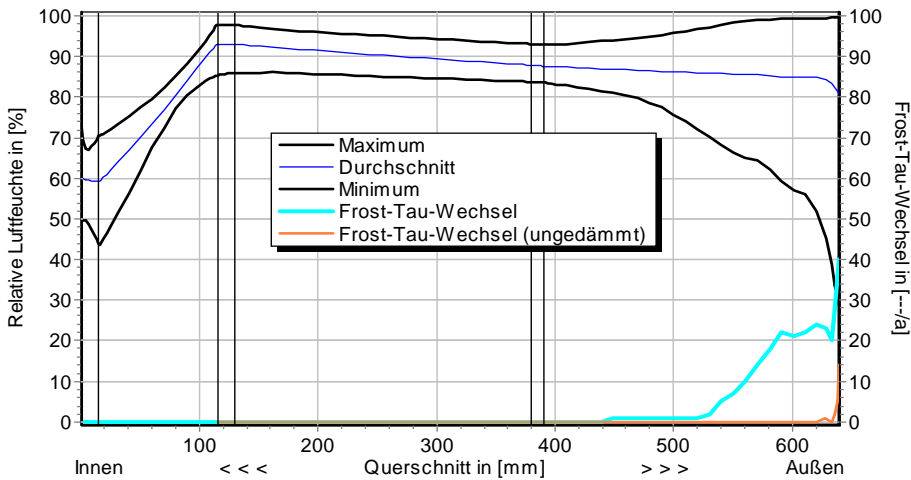
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



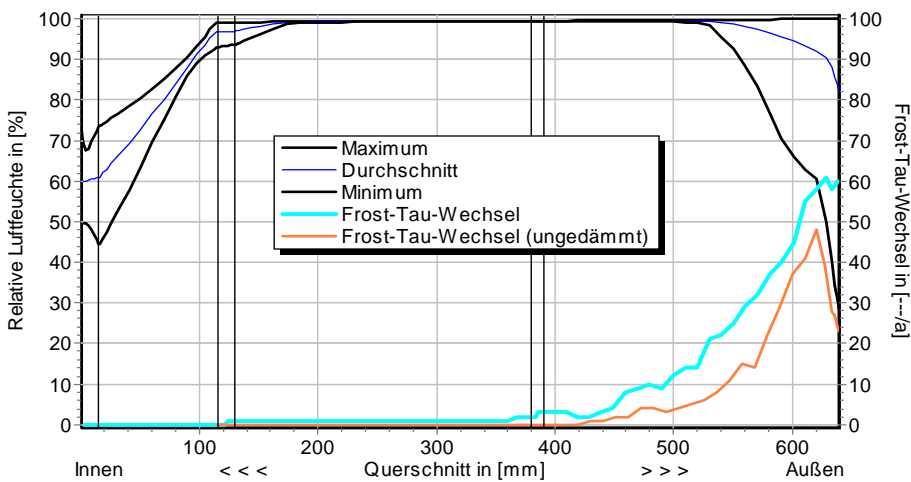
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)

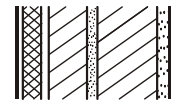


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	97/92
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	31	35	41
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	89,1	88,9	88,4
	WL_w	%	100	111,5	115,1	123,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,3	97,5	97,5
	CIL_{φ}	%	100	96,7	96,0	94,5
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	35 mm	50 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	22/15	233/153
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	58	61	66
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	89,7	89,6	88,0
	WL_w	%	100	108,0	109,8	112,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,8	97,6	97,3
	CIL_{φ}	%	100	99,0	98,5	96,6

4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwoleleichtbauplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	(✓)	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	(✗)	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	35 mm	50 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

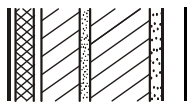
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Ab 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz eingehalten, mit allen Dämmdicken treten zu hohe Kondensatmengen auf.
- COND: Ab 50 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz eingehalten, mit allen Dämmdicken treten zu hohe Kondensatmengen auf.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Ohne Schlagregen wird der erlaubte massebezogene Feuchtegehalt nicht überschritten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge bilden sich bei allen Dämmvarianten zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung ist nicht gewährleistet. Die Tauwassermengen des Aufbaus mit 35 mm Dämmung sind von einer Bewertung ausgenommen (*DIN 4108-3 Abs. 4.3.2.2*). Ausreichender Schutz gegen Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel besteht ab 50 mm Dämmung.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

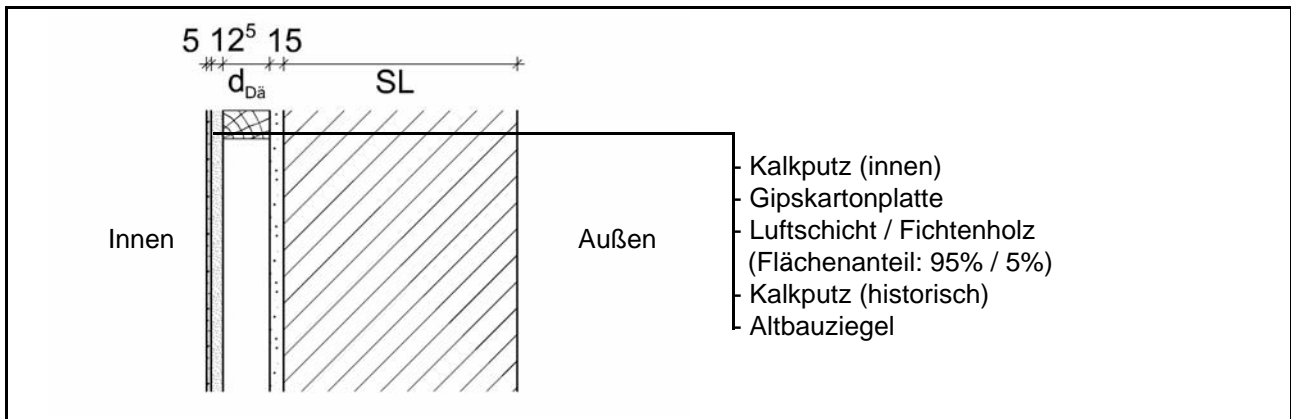
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.3



5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Luftschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 30mm/1 SL, 50mm/1½ SL, 60mm/2 SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Gipskartonplatte	850	0,20	10	0,7	55,1	0,280
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Luftschicht***	1,3	DIN 6946	$\mu = f(\text{Konv.})$	-	-	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

λ und μ gemäß DIN 6946 bzw. Konvektionsverhältnissen

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

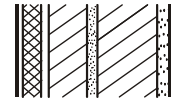
	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	0,58	0,74	0,92
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	1,33	1,09	0,92
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,197	0,397	0,083
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,400	3,349	0,658
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,575	0,635	0,673

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	0,58	0,74	0,92
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	1,34	1,10	0,92
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,998	0,327	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,400	3,349	0,658
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	66,0	65,4	62,7
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,55	0,79	0,91
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,25	0,26	0,26
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	29,4	20,1	15,6

5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet



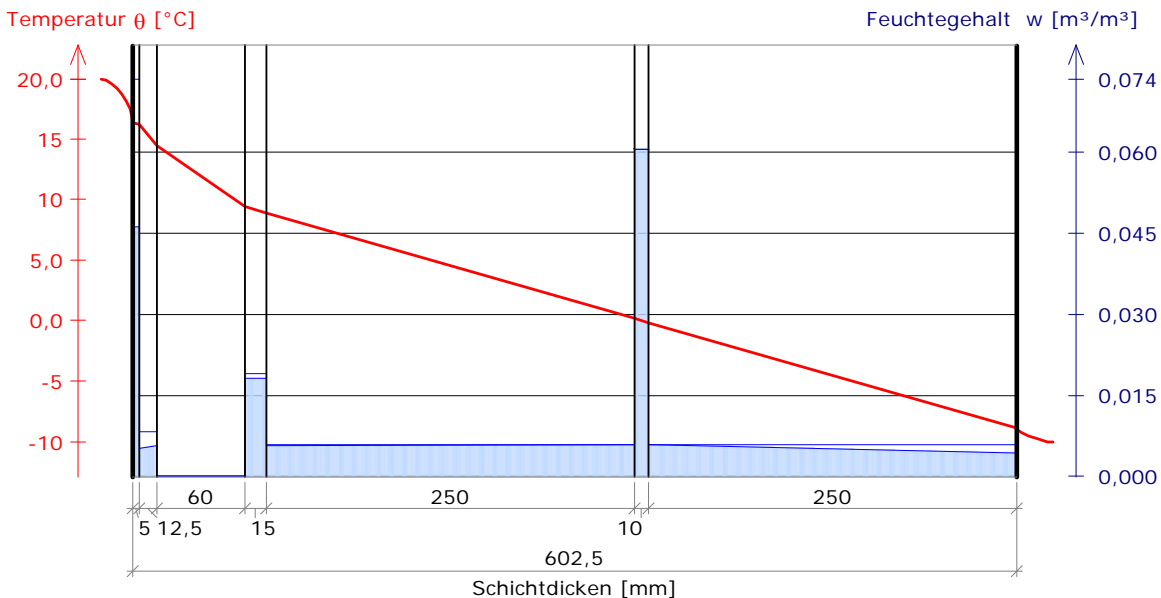
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

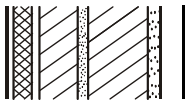
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		60mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 60 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen, Schnitt durch Luftschicht

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	16,4	1863	1169	0,046		
				0,046		
2 Gipskartonplatte	16,2	1841	1158	0,005		
3 Luftschicht 60 mm (vertikal)	14,4	1647	1132	0,006		
				0,000		
4 Kalkputz (historisch)	9,4	1183	1128	0,000		
				0,018		
5 Altbauziegel	8,9	1143	1091	0,018		
				0,006		
6 Lehmörtel (historisch)	0,2	620	620	0,006	0,0	0,00
				0,061	10,0	0,00
7 Altbauziegel	-0,2	603	603	0,061		
				0,006	0,0	0,00
Luftschicht (Außenseite)	-8,9	287	208	0,004		
	-10	260	208			





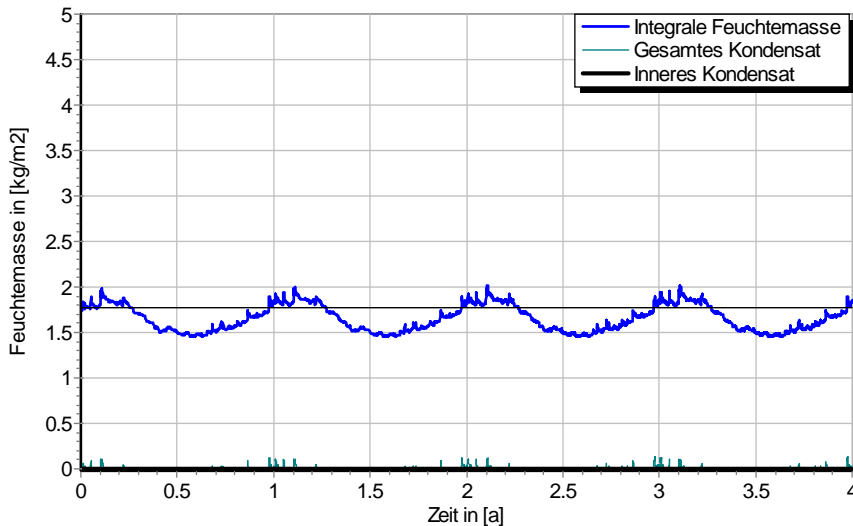
5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



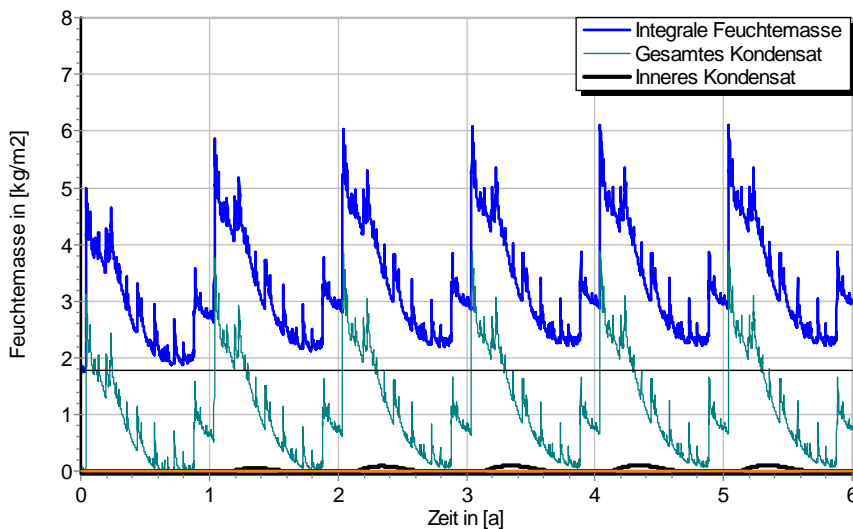
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 60 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,402	0,275	0,230
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,047	0,0	0,0



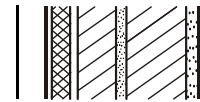
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 60 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante (2 SL) in orange

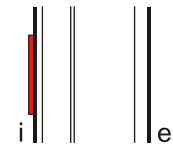
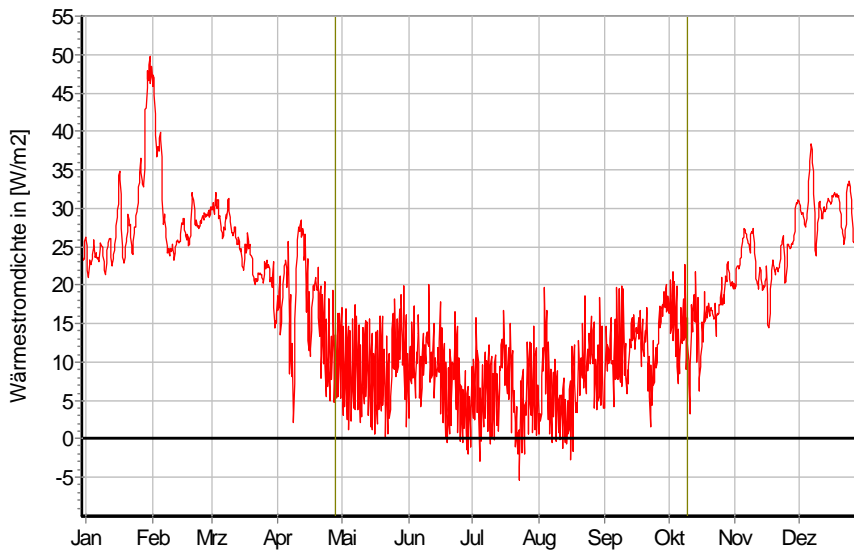
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	3,776	3,913	4,321
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	0,331*	0,018*	0,113*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet



5.2 Instationäre Wärmeverluste

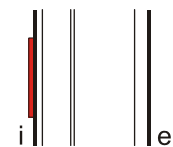
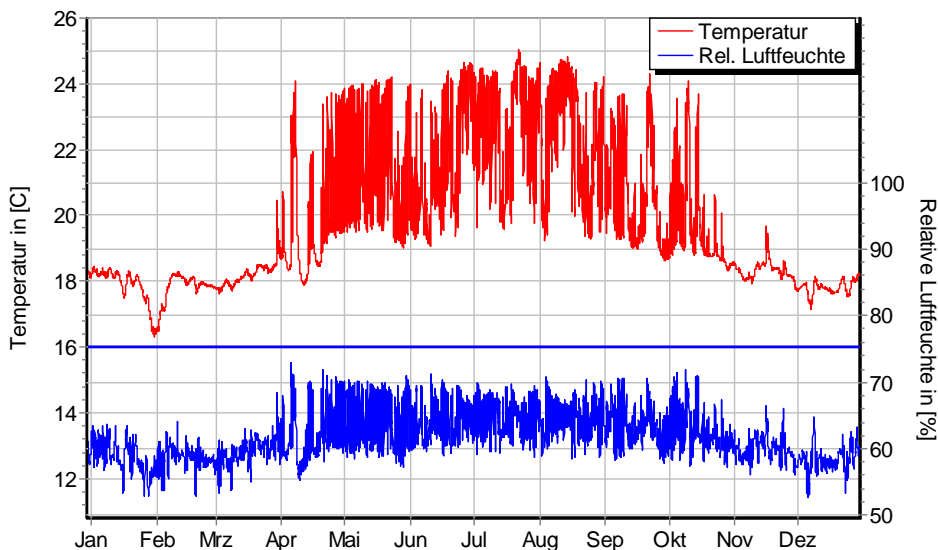


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

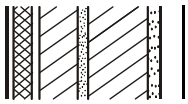
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	60 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	24,32	19,81	16,81
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,53	1,38	1,13	0,96
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	0,55	0,72	0,88

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	60 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	24,02	19,55	16,60
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,52	1,37	1,11	0,94
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	0,56	0,73	0,89

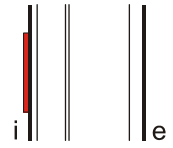
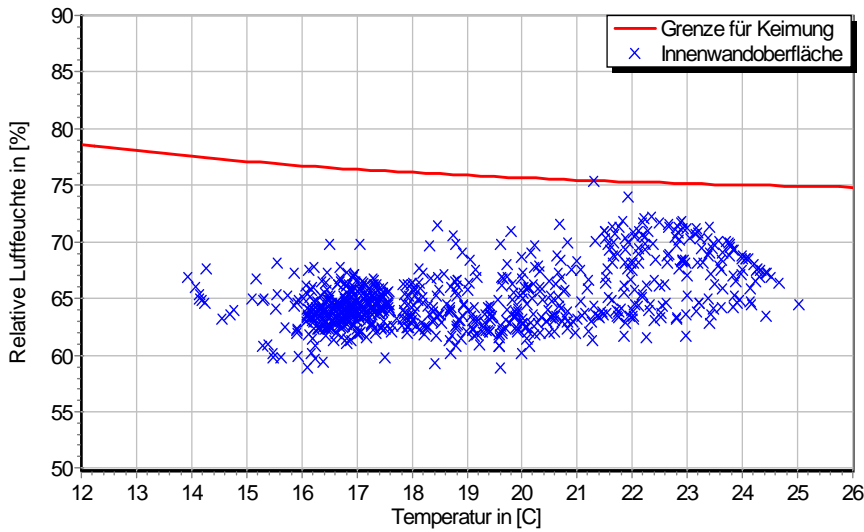
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



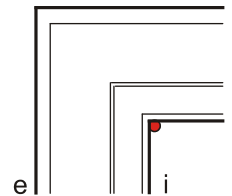
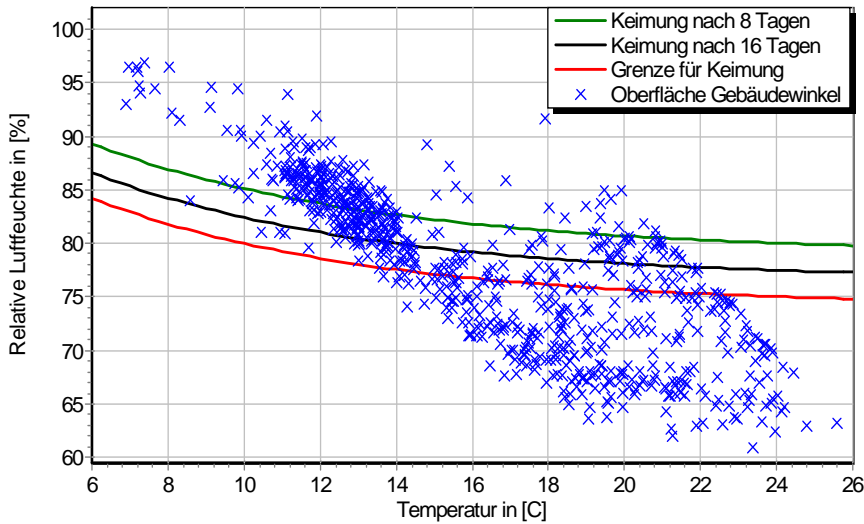
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet

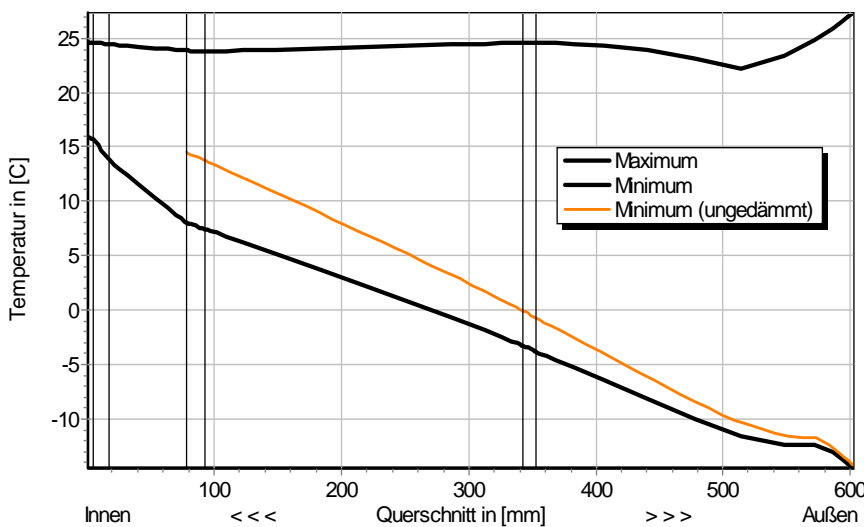


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



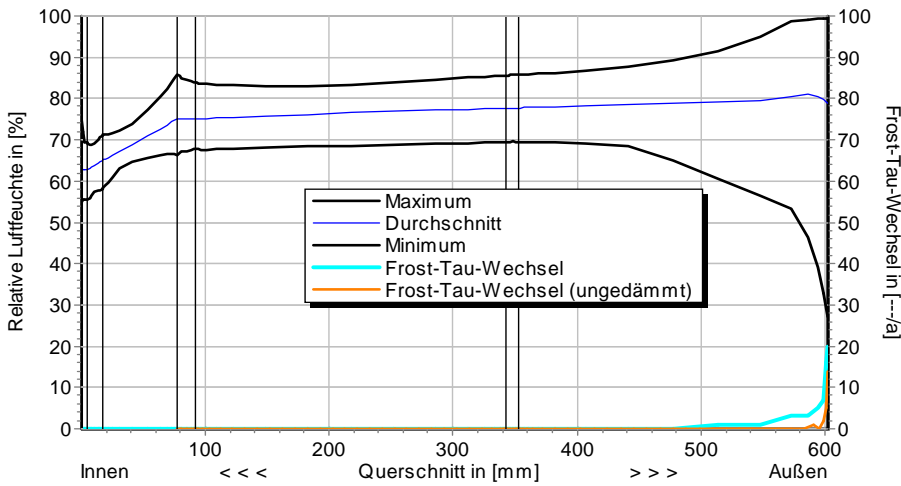
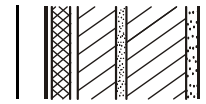
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

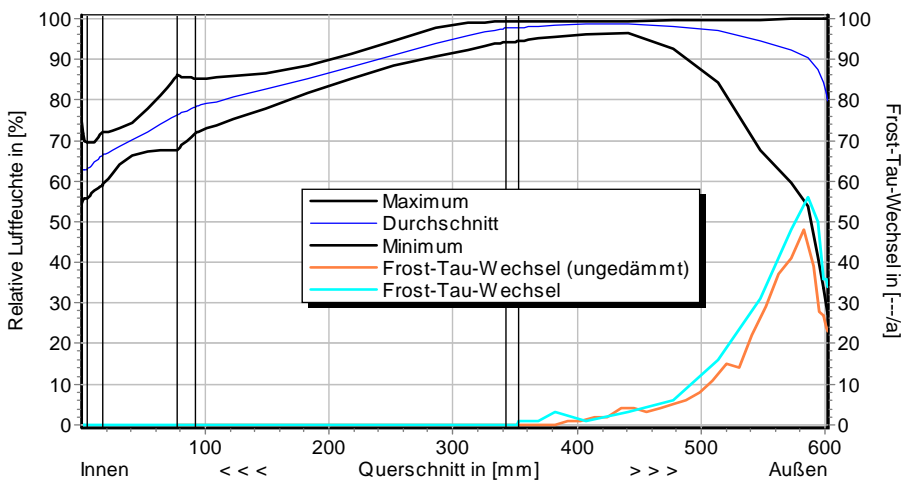


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 60$ mm und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet



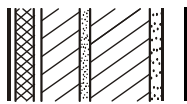
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 60 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 60 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	57/57	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	14	20	25
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	98,5	99,0	99,6
	WL_w	%	100	99,9	104,4	103,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,7	98,6	98,8
	CIL_{φ}	%	100	93,6	94,7	94,4
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	112/100	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	38	45	50
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	98,3	99,4	99,8
	WL_w	%	100	108,4	107,7	104,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	96,0	98,1	99,0
	CIL_{φ}	%	100	99,2	99,3	99,4



5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	○	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	✗	✗

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	60mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen fehlendem Mindestwärmeschutz.

COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen fehlendem Mindestwärmeschutz.

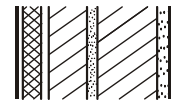
Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird von keiner Konstruktionsvariante eingehalten. Unabhängig von der Einwirkung von Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung eingehalten. Schimmelpilzwachstum ist im Gebäudewinkel bei allen Varianten zu erwarten.

Vorzugsvarianten: keine.

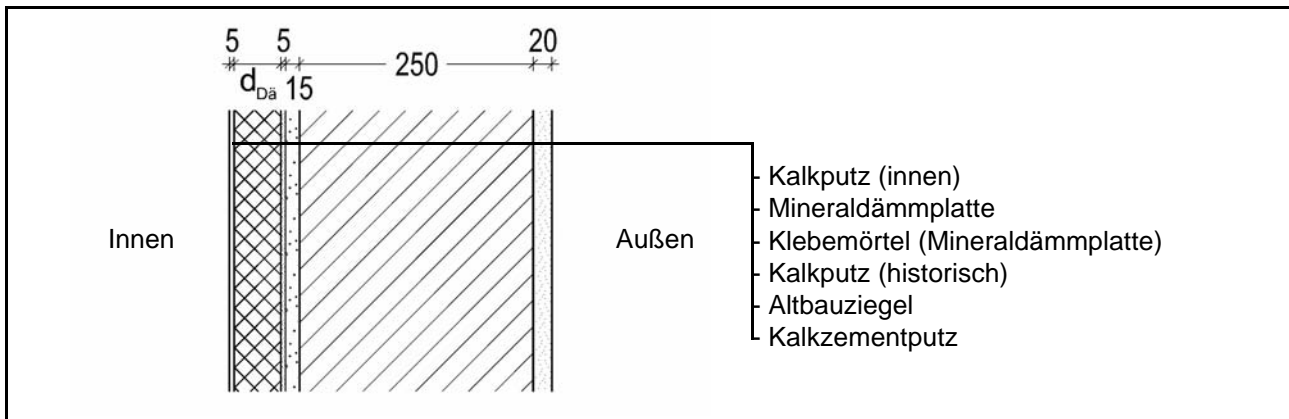
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3

6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Da} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineralfüllplatte	115	0,045	4,1	1,0	36,1	0,004
Klebemörtel (Mineralfüllplatte)	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

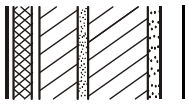
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	1,06	1,50	2,17
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,82	0,60	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,779	2,365	1,812
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,644	2,570	1,821
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,724	0,781	0,828

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	1,04	1,49	2,15
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,83	0,60	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,479	2,073	1,541
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,644	2,570	1,821
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	61,2	57,9	55,5
Innendämmsystem: ** feuchteabhängig						
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,2	23,5	10,7



6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

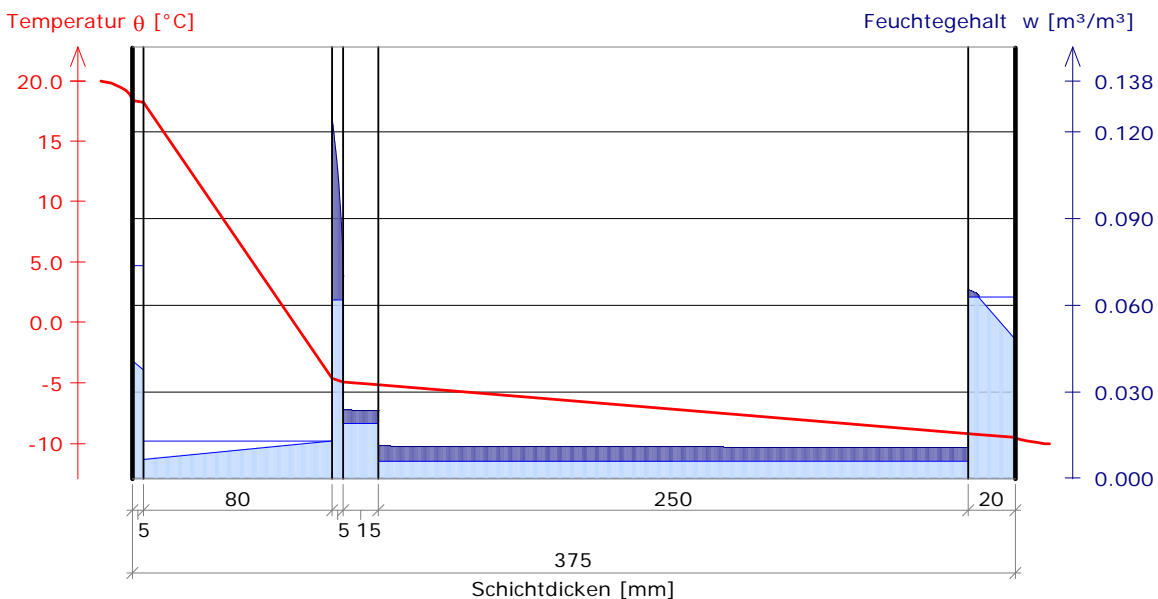
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

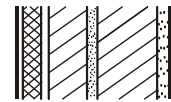
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m ³ /m ³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m ²]
Luftschicht (Innenseite)	20.0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18.3	2106	1169	0.041		
				0.037		
2 Mineralfüllplatte	18.2	2095	1065	0.007		
3 Klebemörtel	-4.7	414	414	0.138	0.5	0.05
				0.125	5.0	0.21
4 Kalkputz (historisch)	-4.9	404	404	0.070		
				0.024	15.0	0.07
5 Altbauziegel	-5.2	396	396	0.023		
				0.011	250.0	1.21
6 Kalkzementputz	-9.2	280	280	0.010	4.7	0.01
				0.065		
Luftschicht (Außenseite)	-9.5	272	208	0.048		
	-10	260	208			



6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten

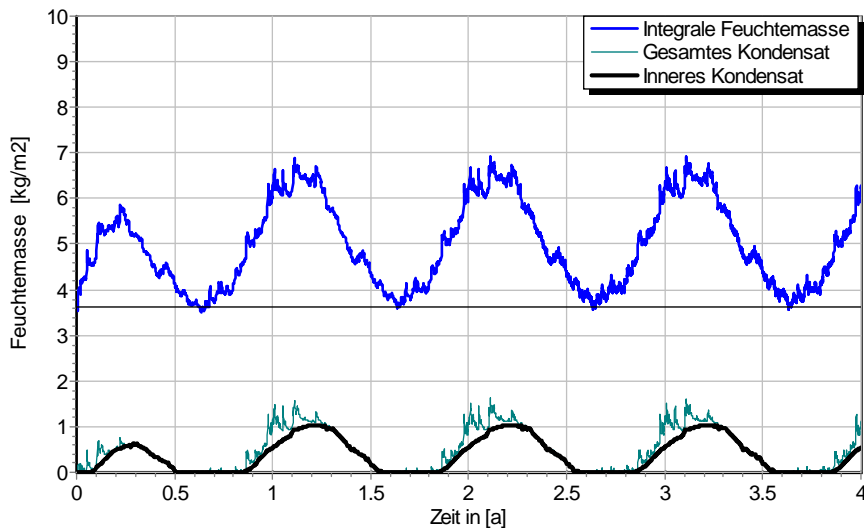


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



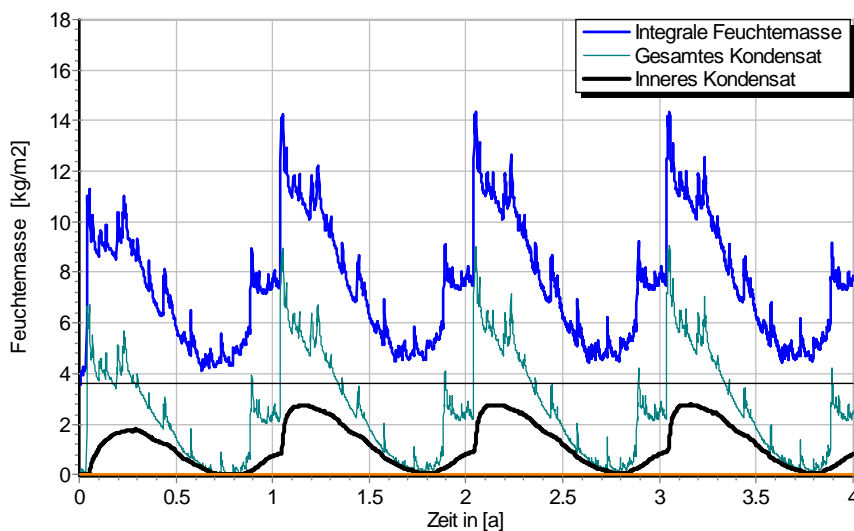
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	2,392	2,924	3,297
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,534	0,690	1,040

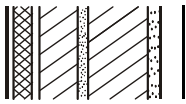


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

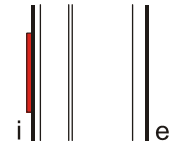
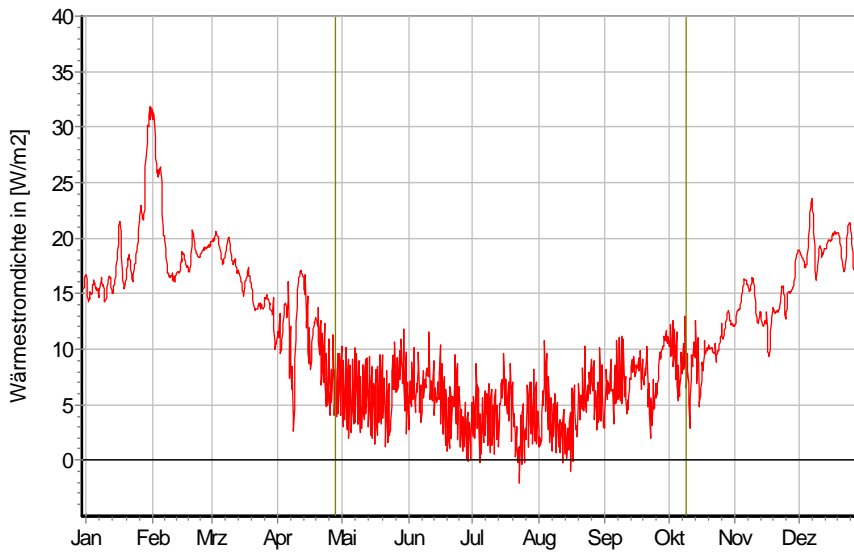
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	9,175	9,830	10,743
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	1,681*	2,098*	2,627*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

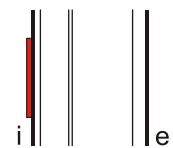
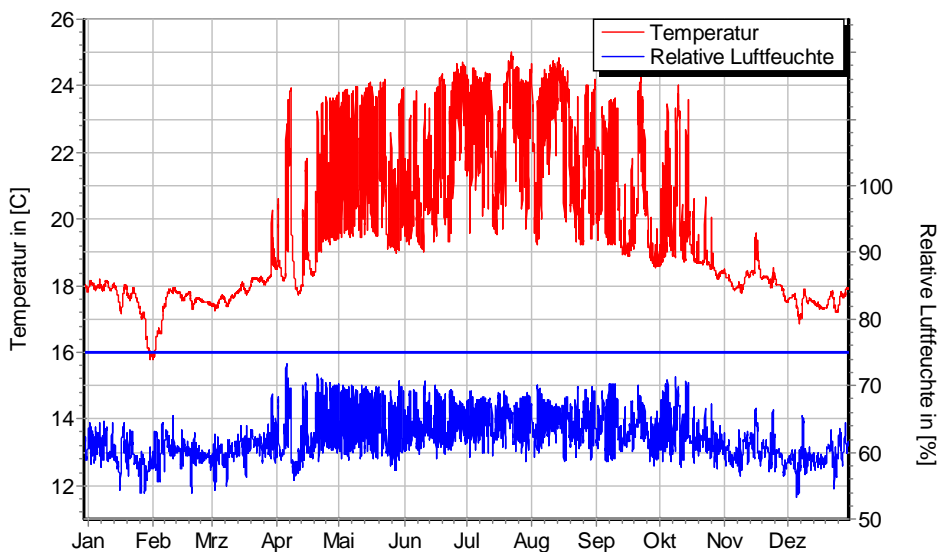


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	15,63	11,66	8,32
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	0,89	0,66	0,47
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,96	1,34	1,94

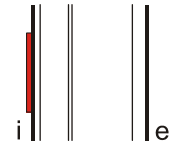
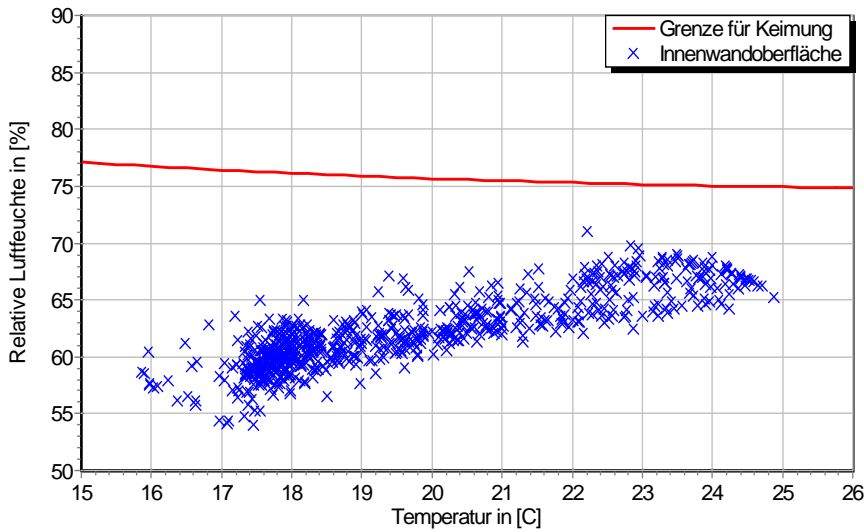
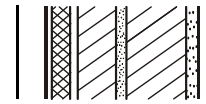
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	15,44	11,58	8,39
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	0,88	0,66	0,48
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,97	1,35	1,93

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

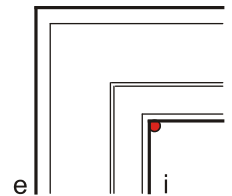
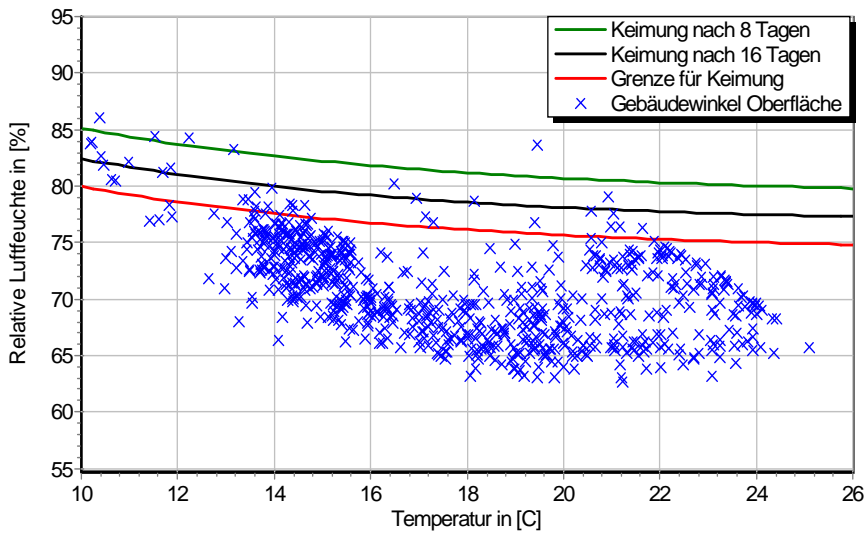


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

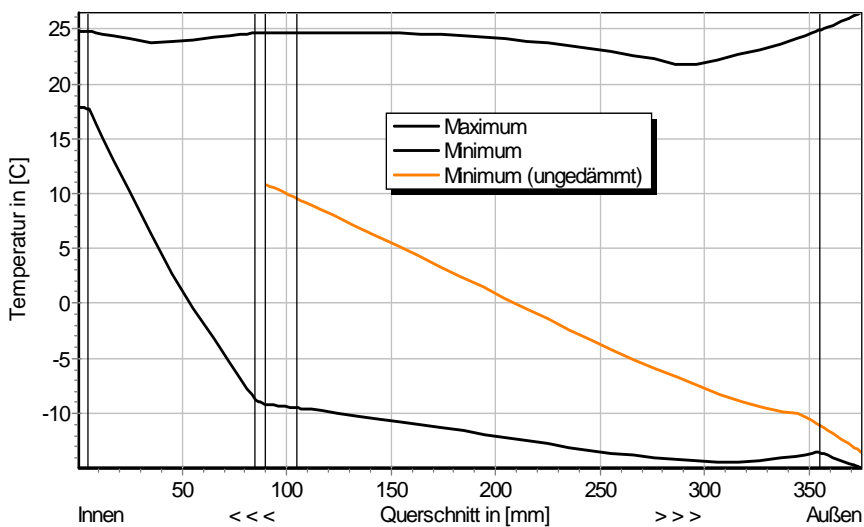


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

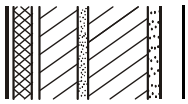


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

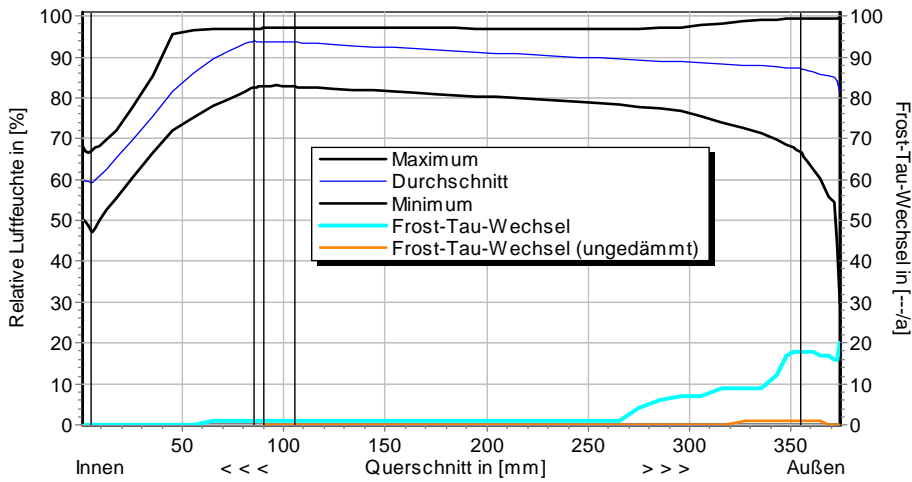
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



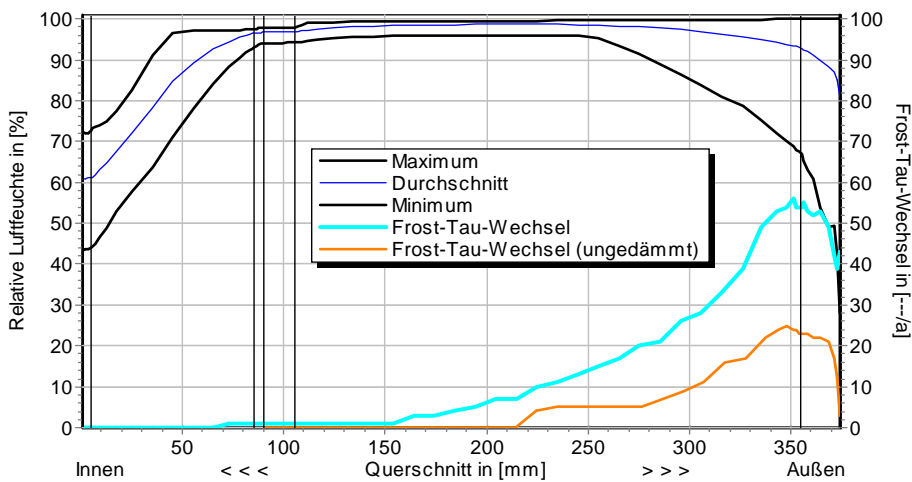
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

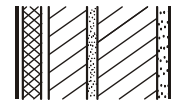


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	16	22	29	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,1	96,5	96,0	
	WL_w	%	100	90,8	85,1	81,8	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	103,6	103,3	103,0	
	CIL_φ	%	100	98,3	96,8	95,1	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	46	52	58	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,6	97,1	96,5	
	WL_w	%	100	106,7	108,5	109,9	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,4	96,5	95,8	
	CIL_φ	%	100	109,0	109,3	108,8	

6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

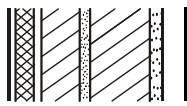
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen und bei 30 mm Dämmung wegen nicht eingehaltenem Mindestwärmeschutz.
- COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen und bei 30 mm Dämmung wegen nicht eingehaltenem Mindestwärmeschutz.
- Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllt die Konstruktion mit 30 mm Dämmung nicht den Mindestwärmeschutz, mit 80 mm Dämmung tritt eine zu hohe Kondensatmenge auf. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge bilden sich zu hohe Kondensatmengen, mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten. Mit 80 mm Dämmung ist auch die Verdunstung des Kondensats nicht gewährleistet. Im Gebäudewinkel ist Schimmelpilzwachstum ab 50 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

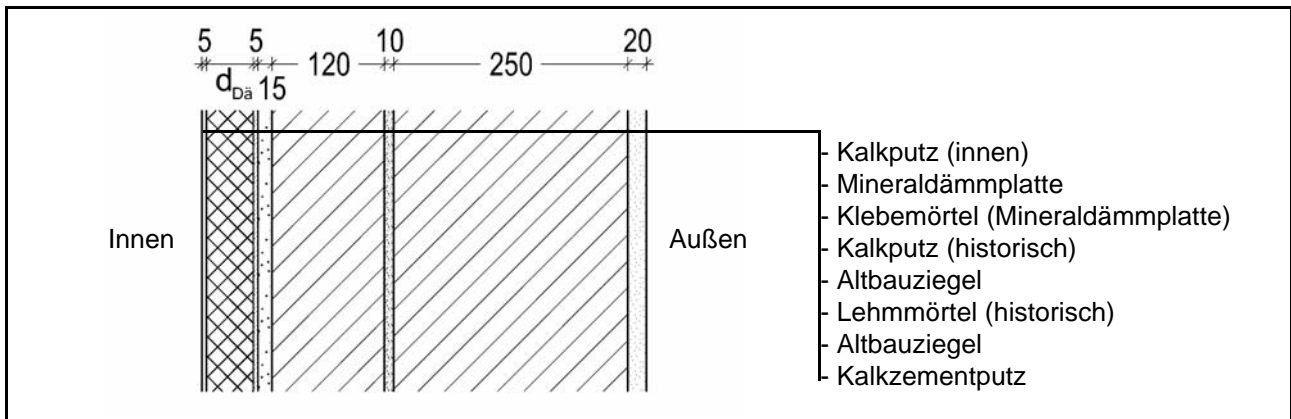
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Identische Konstruktion mit Klima TRY-Region 4 - Potsdam: 6.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1
-



6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineralfüllplatte	115	0,045	4,1	1,0	36,1	0,004
Klebmörtel (Mineralfüllplatte)	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

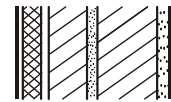
	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,52	1,22	1,67	2,33
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,45	0,72	0,54	0,40
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,182	2,035	1,664
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,651	2,577	1,749
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,537	0,743	0,793	0,901

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,52	1,21	1,65	2,32
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,45	0,73	0,55	0,40
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,919	1,760	1,389
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,651	2,577	1,749
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	71,5	59,7	57,1	55,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,2	23,5	10,7

6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



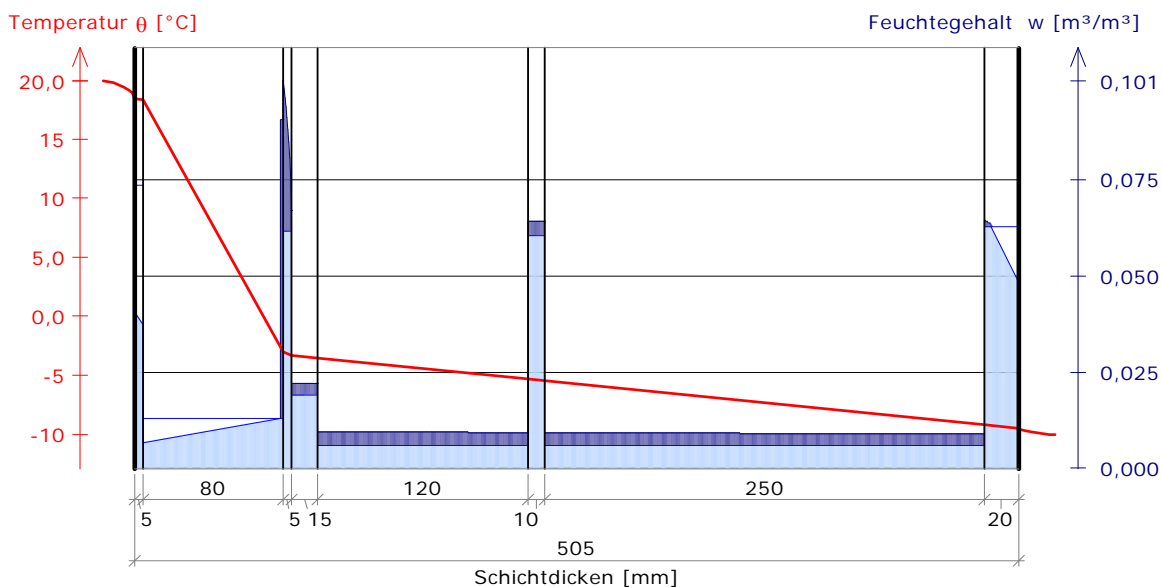
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

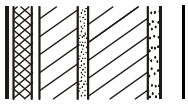
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,4	2121	1169	0,041		
				0,037		
2 Mineralfüllplatte	18,4	2111	1073	0,007		
				0,091	0,4	0,02
3 Klebemörtel	-3,0	475	475	0,101	5,0	0,13
				0,067		
4 Kalkputz (historisch)	-3,3	465	465	0,022	15,0	0,04
				0,022		
5 Altbauziegel	-3,5	456	456	0,009	120,0	0,40
				0,009		
6 Lehmörtel (historisch)	-5,3	391	391	0,064	10,0	0,04
				0,064		
7 Altbauziegel	-5,5	386	386	0,009	250,0	0,75
				0,009		
8 Kalkzementputz	-9,2	278	278	0,064	3,8	0,00
				0,048		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	271	208			
	-10	260	208			





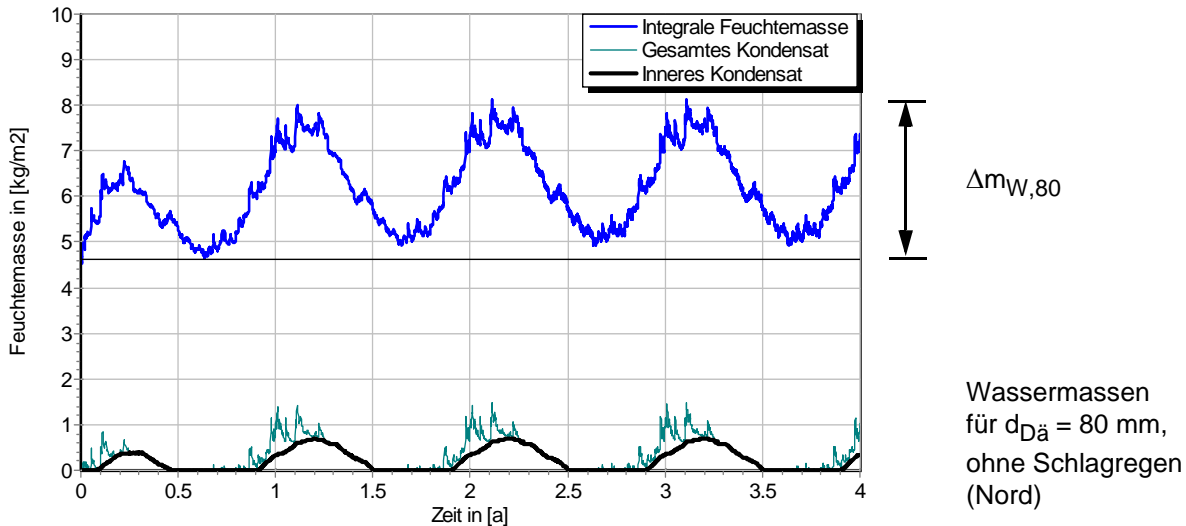
6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

5 Simulationsergebnisse

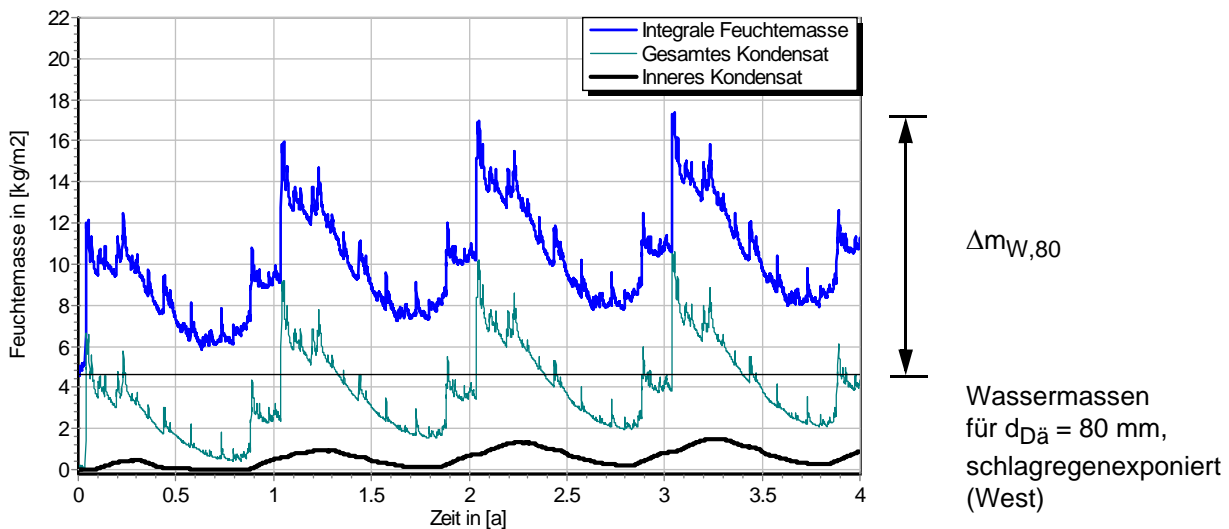
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen

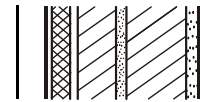


Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m^2	0,935	2,566	3,073	3,519
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m^2	-	0,356	0,509	0,691

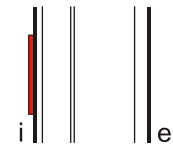
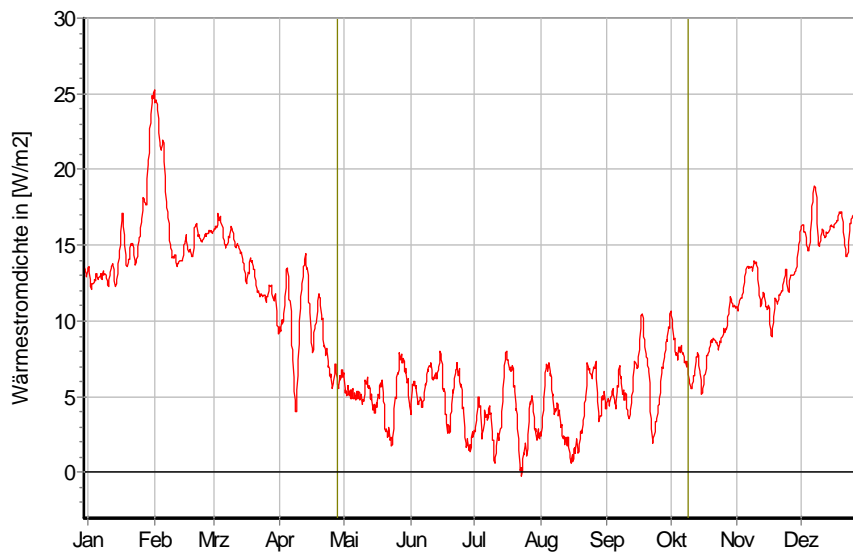


Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m^2	7,372	10,140	11,563	12,958
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m^2	-	0,480	0,921	1,569

6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

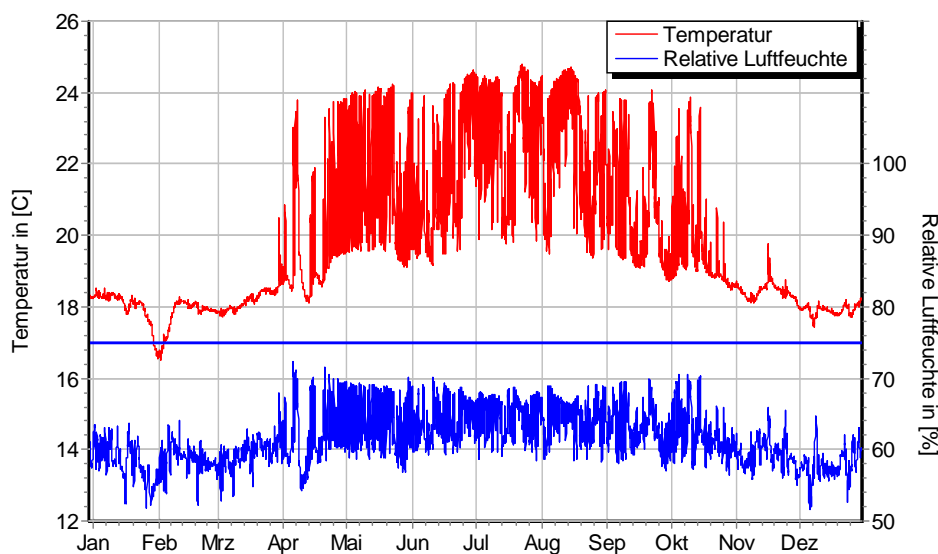


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

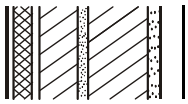
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,55	13,35	10,30	7,59
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,51	0,76	0,59	0,4
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	1,15	1,54	2,15

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,18	13,23	10,27	7,65
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,49	0,75	0,58	0,44
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,50	1,16	1,54	2,13

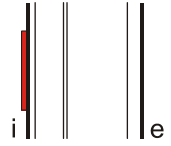
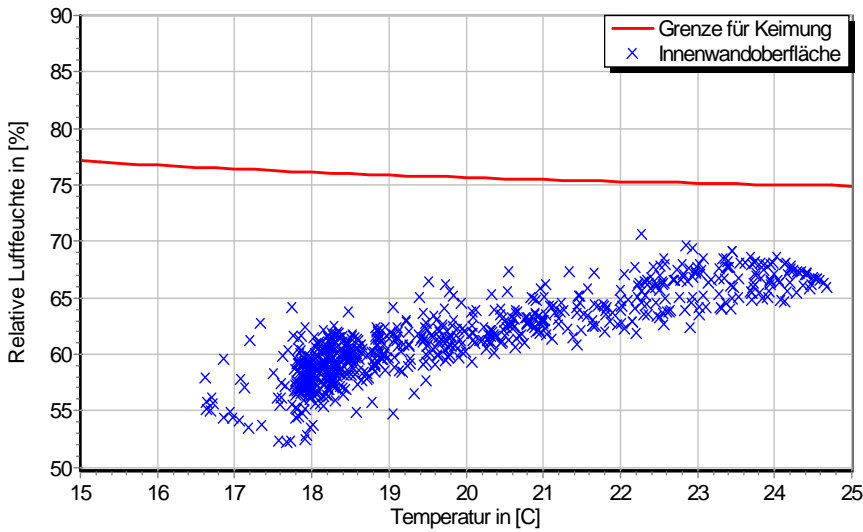
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



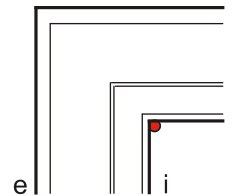
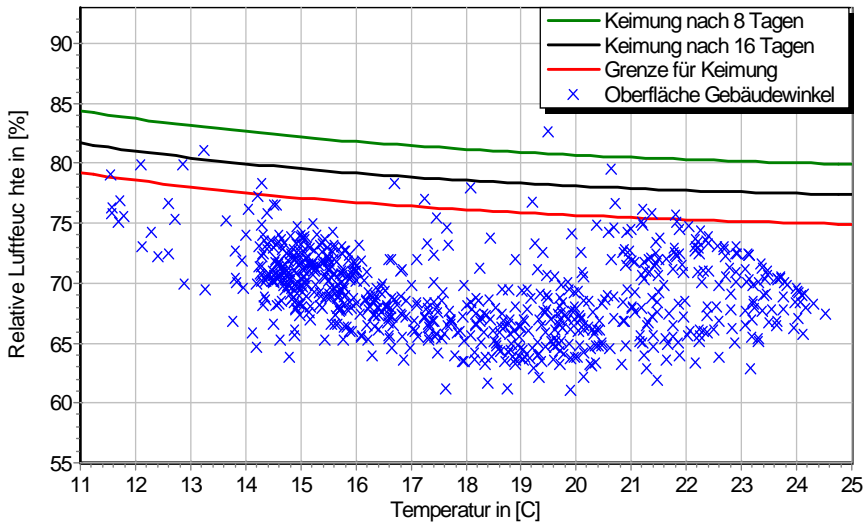
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

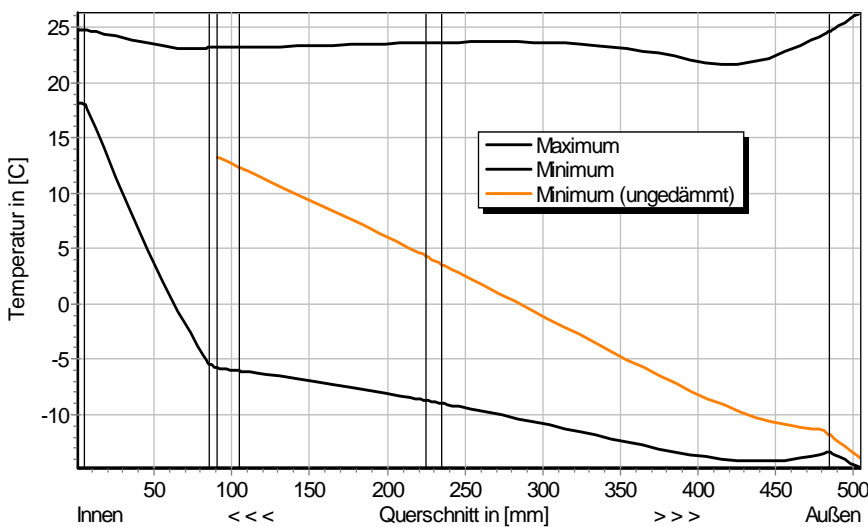


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



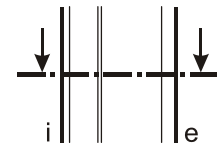
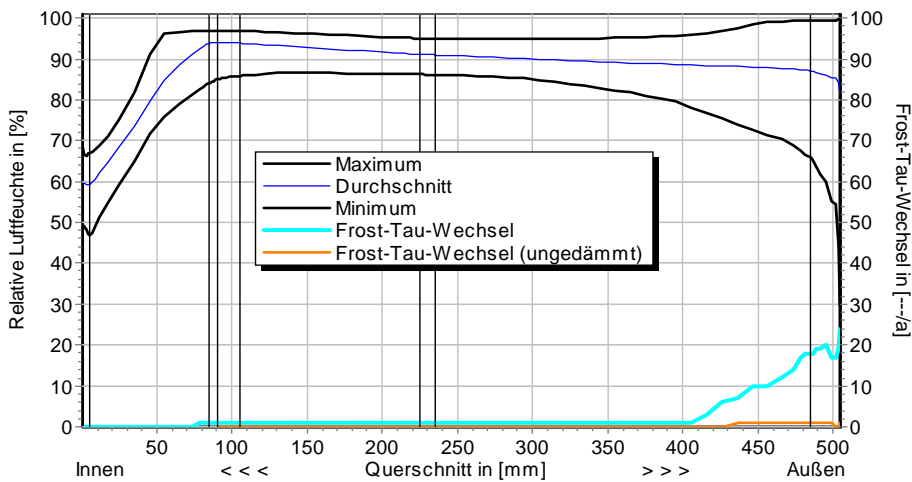
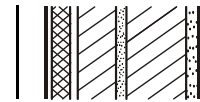
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

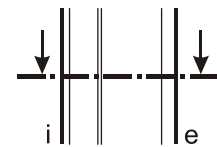
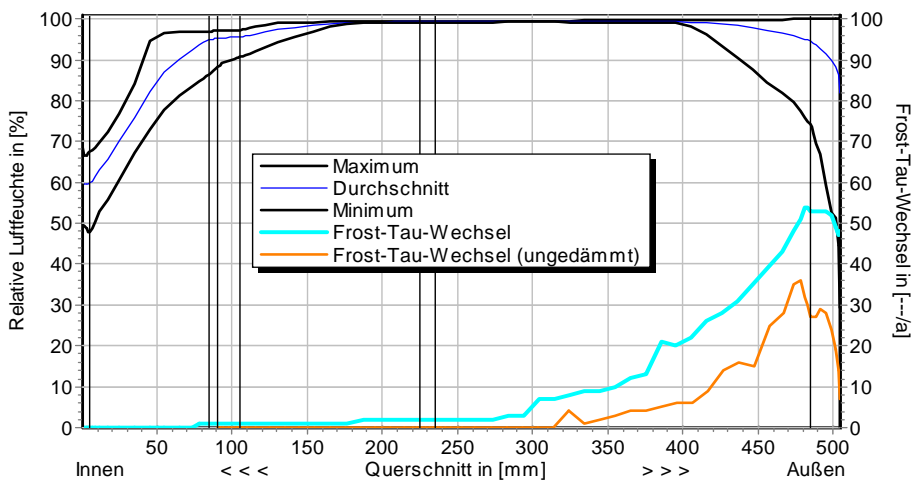


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten



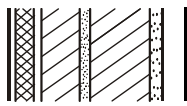
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	19	24	31
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,8	97,3	97,0
	WL_w	%	100	86,7	83,1	80,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,4	101,5	101,7
	CIL_φ	%	100	98,2	96,5	94,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	27	49	54	59
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,2	97,8	97,3
	WL_w	%	100	104,4	105,7	106,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,1	97,8	97,4
	CIL_φ	%	100	105,0	105,1	105,2



6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineralfällmplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

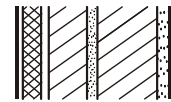
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz und die Verdunstung werden eingehalten.
- COND: Keine Konstruktion erfüllt die Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz und die Verdunstung werden eingehalten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist mit allen Dämmstoffdicken gegeben. Ohne Schlagregen werden alle Kriterien eingehalten.
Bei hoher eindringender Schlagregenmenge zu hohe Kondensatmengen mit 80 mm Dämmung, die Verdunstung des Kondensats ist mit 50 und 80 mm Dämmung gewährleistet. Bei den gedämmten Varianten ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 und 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

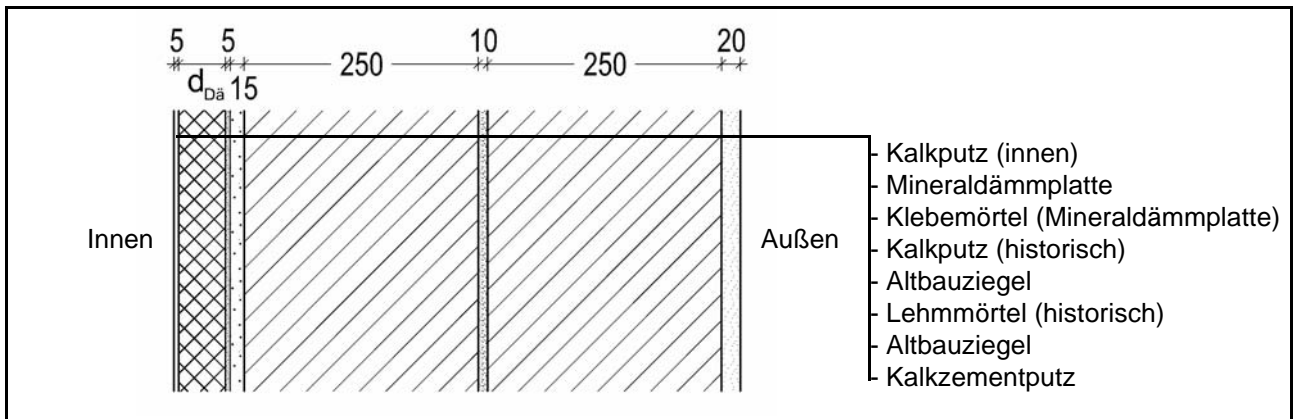
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.2
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Identische Konstruktion mit Klima TRY-Region 4 - Potsdam: 6.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.5
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineralfüllplatte	115	0,045	4,1	1,0	36,1	0,004
Klebemörtel (Mineralfüllplatte)	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

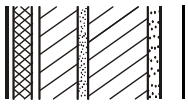
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,68	1,38	1,83	2,49
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,17	0,64	0,50	0,38
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,650	1,757	1,518
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,651	2,577	1,711
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,590	0,761	0,804	0,841

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,68	1,37	1,82	2,48
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,17	0,65	0,50	0,38
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,399	1,485	1,240
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,651	2,577	1,711
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	58,5	56,5	54,8
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,2	23,5	10,7



6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

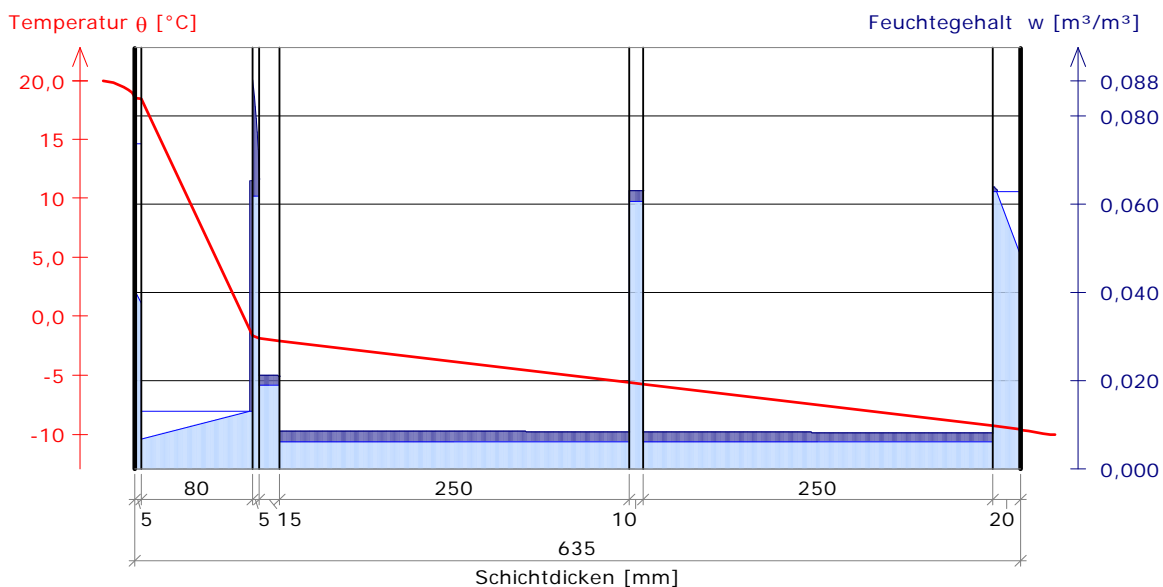
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

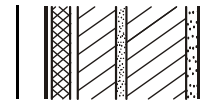
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,5	2134	1169	0,040		
				0,037		
2 Mineralfüllplatte	18,5	2124	1081	0,007		
				0,065	0,3	0,01
3 Klebemörtel	-1,6	535	535	0,088	5,0	0,09
				0,066		
4 Kalkputz (historisch)	-1,9	524	524	0,021	15,0	0,03
				0,021		
5 Altbauziegel	-2,1	515	515	0,008	250,0	0,57
				0,008		
6 Lehmörtel (historisch)	-5,6	382	382	0,063	10,0	0,02
				0,063		
7 Altbauziegel	-5,8	377	377	0,008	250,0	0,51
				0,008		
8 Kalkzementputz	-9,3	277	277	0,064	3,2	0,00
				0,048		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	271	208			
	-10	260	208			



6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten

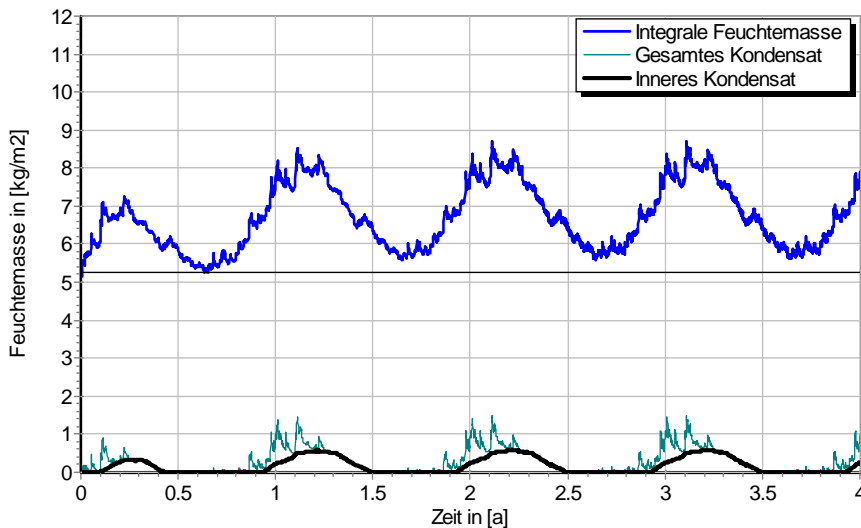


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



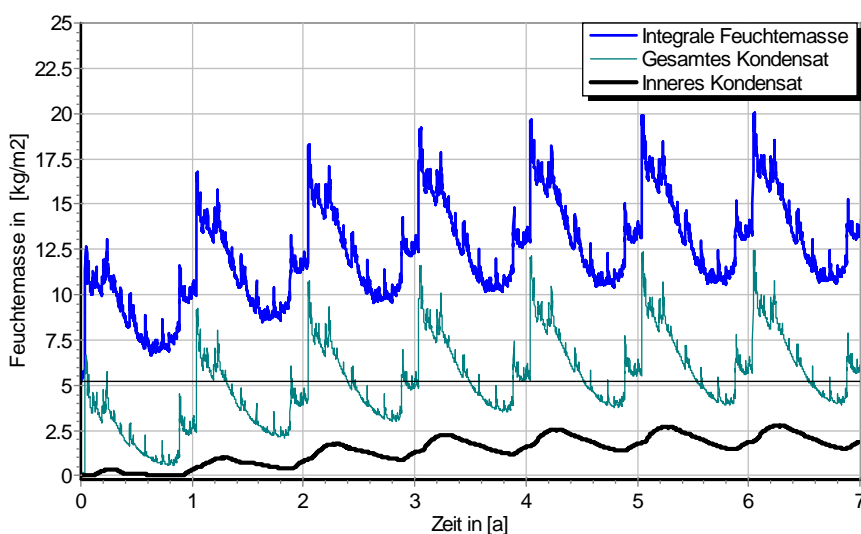
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

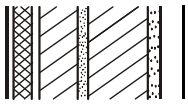
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	1,130	2,373	3,036	3,467
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,216	0,419	0,574



$\Delta m_{W,80}$

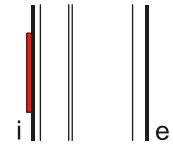
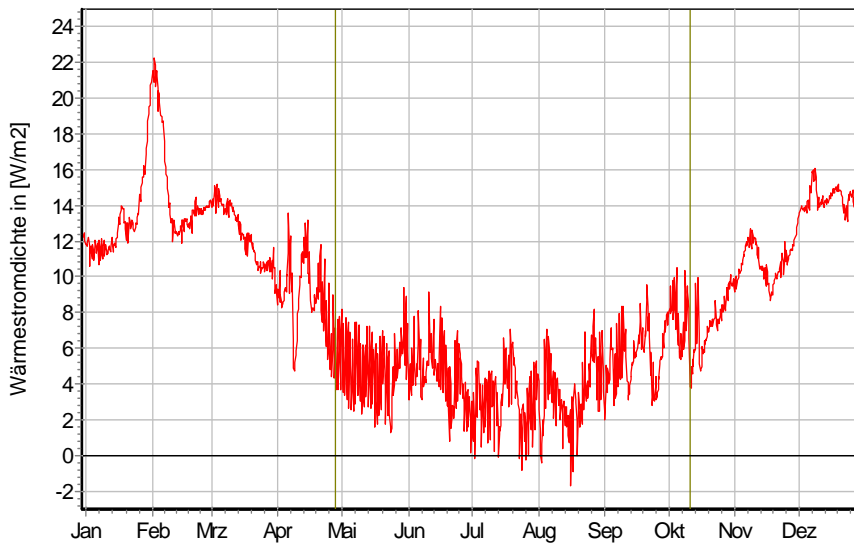
Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,857	11,445	13,190	14,874
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,868	1,800	2,800



6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

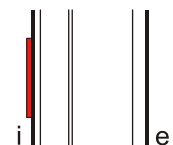
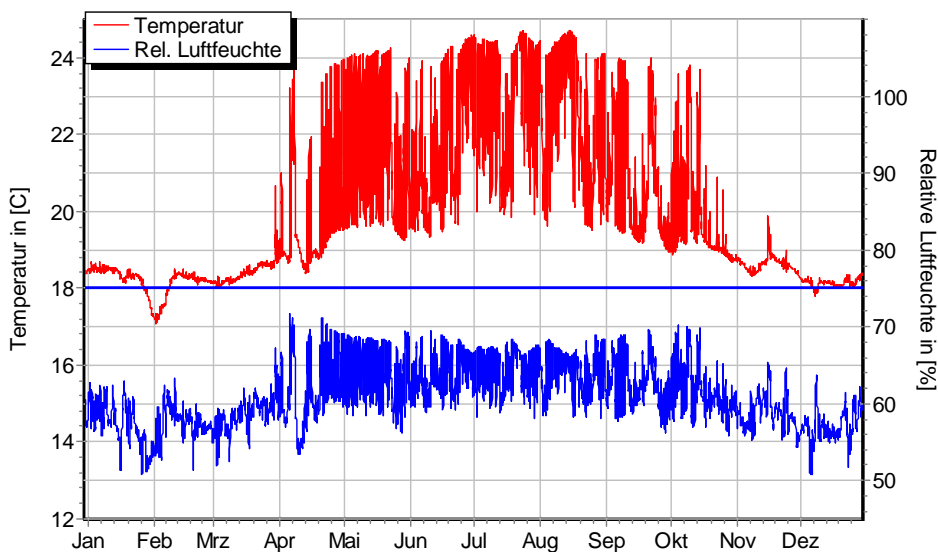


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,48	11,76	9,27	7,01
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,22	0,67	0,53	0,40
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,65	1,33	1,73	2,34

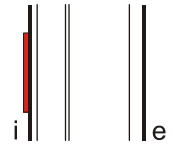
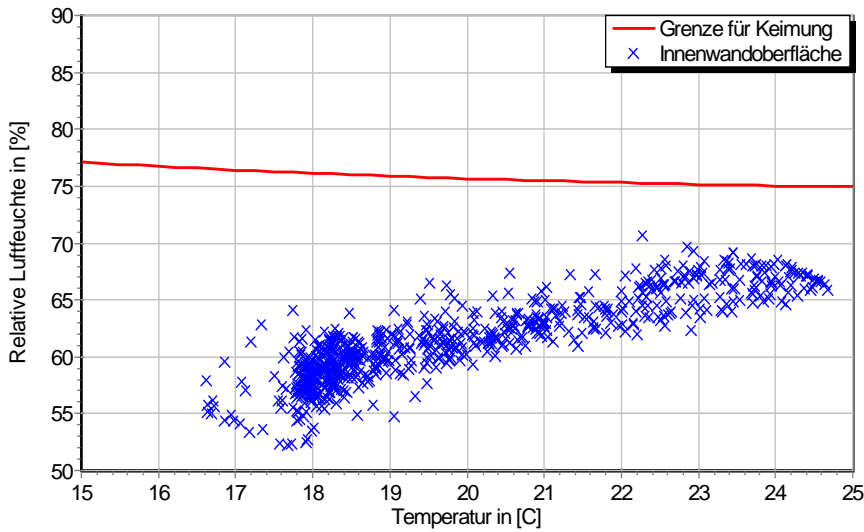
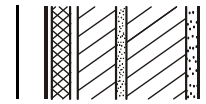
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,17	11,64	9,23	7,03
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,20	0,66	0,52	0,40
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,66	1,34	1,74	2,33

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

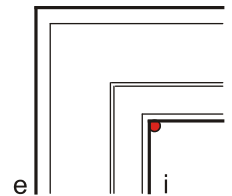
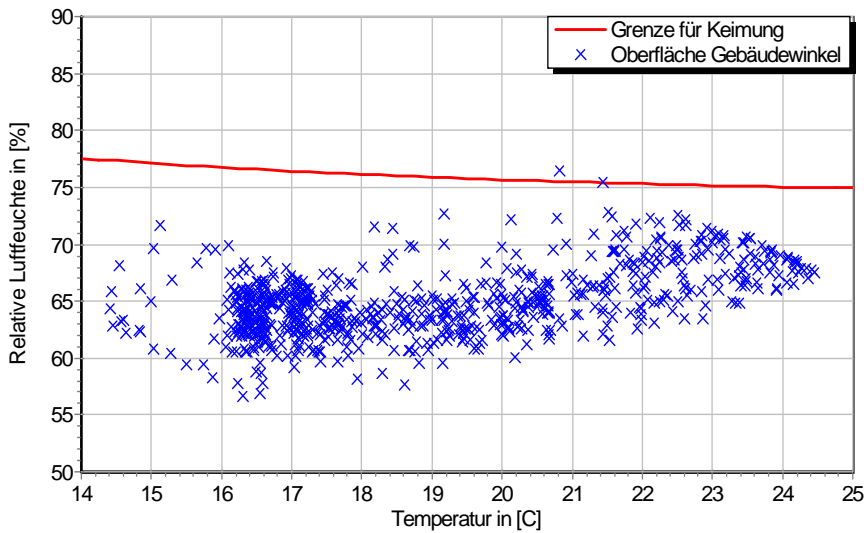


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten

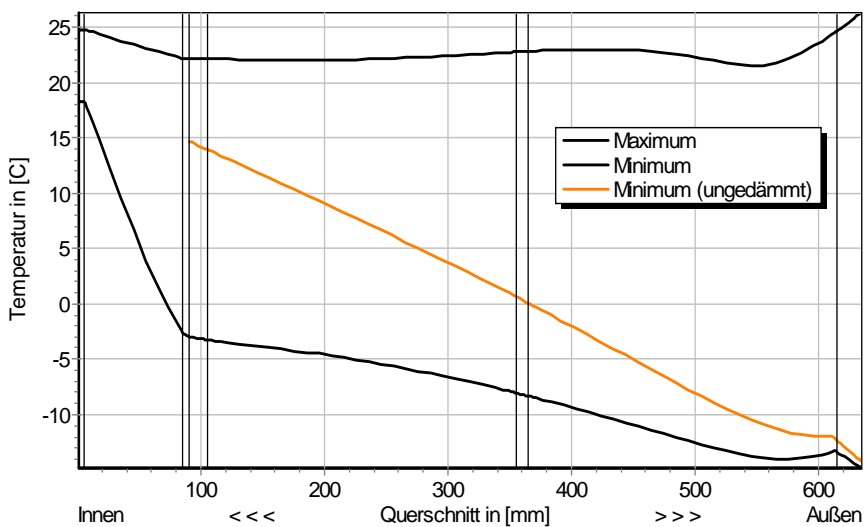


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

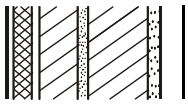


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

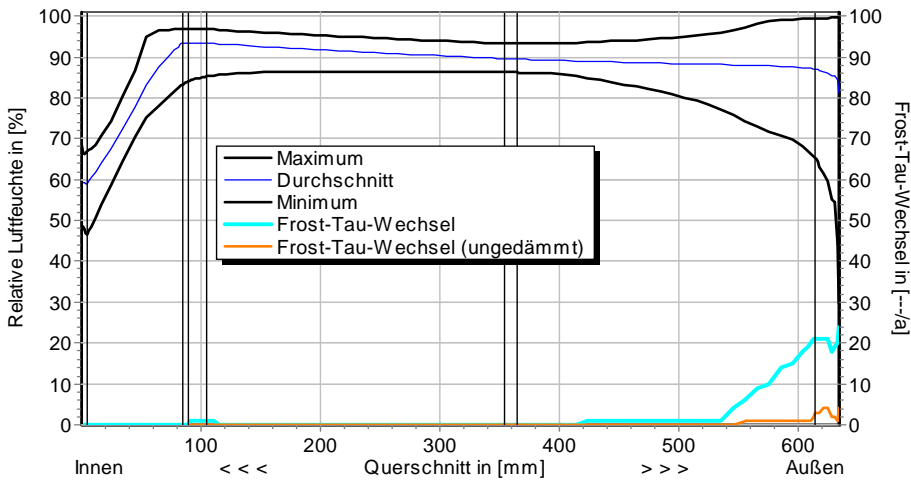
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



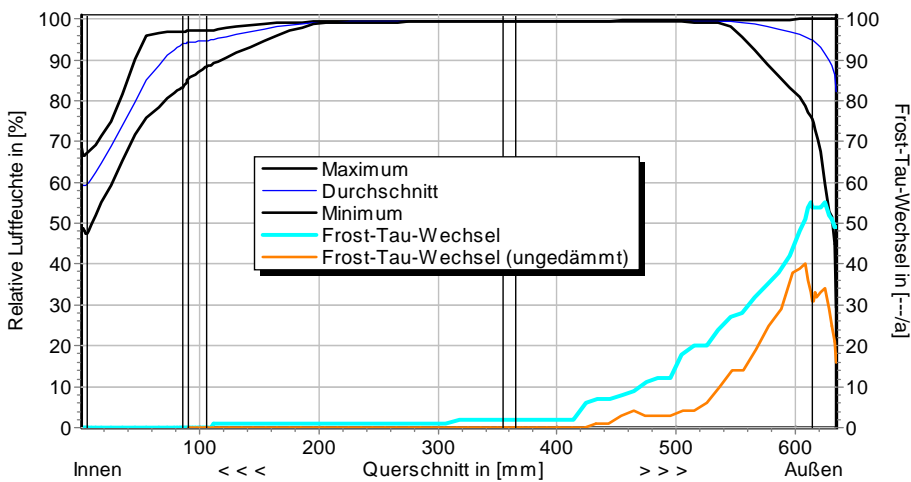
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

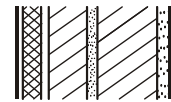


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	8	22	27	32
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,6	98,3	97,9
	WL_w	%	100	87,9	85,0	82,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,0	101,1	101,2
	CIL_φ	%	100	97,7	96,3	94,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	36	52	57	60
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,8	98,4	98,1
	WL_w	%	100	103,4	104,4	105,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,9	98,7	98,5
	CIL_φ	%	100	102,4	102,5	102,7

6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

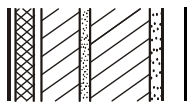
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen, der Mindestwärmeschutz und die Verdunstung werden eingehalten.
- COND: Nur die Variante mit 80 mm Dämmung erfüllt die DIN-Kriterien wegen nicht eingehaltener Mindestwärmeschutz. Die maximale Kondensatmenge und Verdunstung werden immer eingehalten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist mit allen Dämmstoffdicken gegeben. Ohne Schlagregen werden alle Kriterien eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge zu hohe Kondensatmengen mit 80 mm Dämmung, die Verdunstung des Kondensats ist mit 50 und 80 mm Dämmung gewährleistet. Bei den gedämmten Varianten ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 und 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

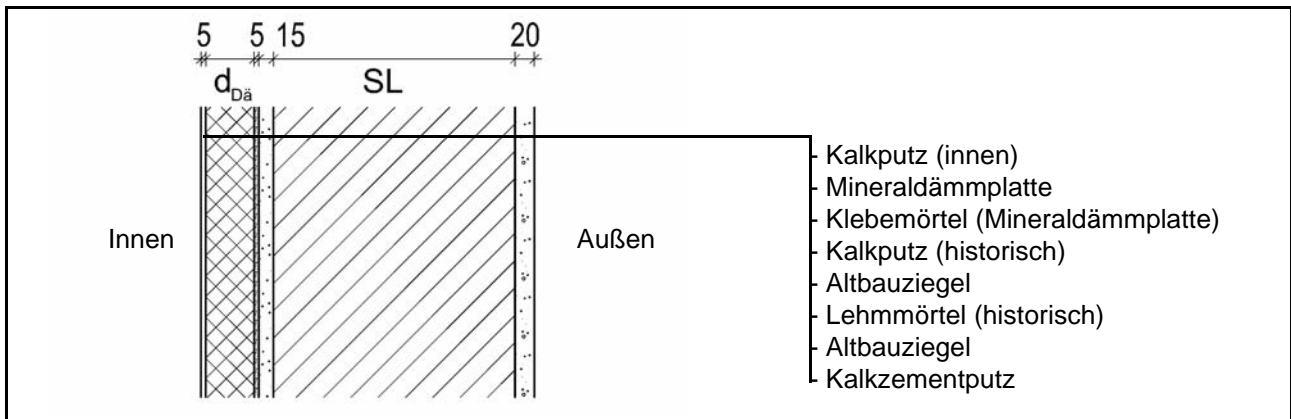
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Identische Konstruktion mit Klima TRY-Region 4 - Potsdam: 6.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30mm/1 SL, 50mm/1½ SL, 80mm/2 SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineraldämmplatte	115	0,045	4,1	1,0	96,2	0,004
Klebemörtel	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

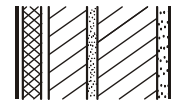
	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	1,06	1,67	2,49
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,82	0,54	0,38
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,779	2,035	1,518
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,644	2,577	1,711
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,46	0,724	0,793	0,841

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanieret,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	1,04	1,65	2,48
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,83	0,55	0,38
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,479	1,760	1,240
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,644	2,577	1,711
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	61,2	57,1	54,8
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,2	23,5	10,7

6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)



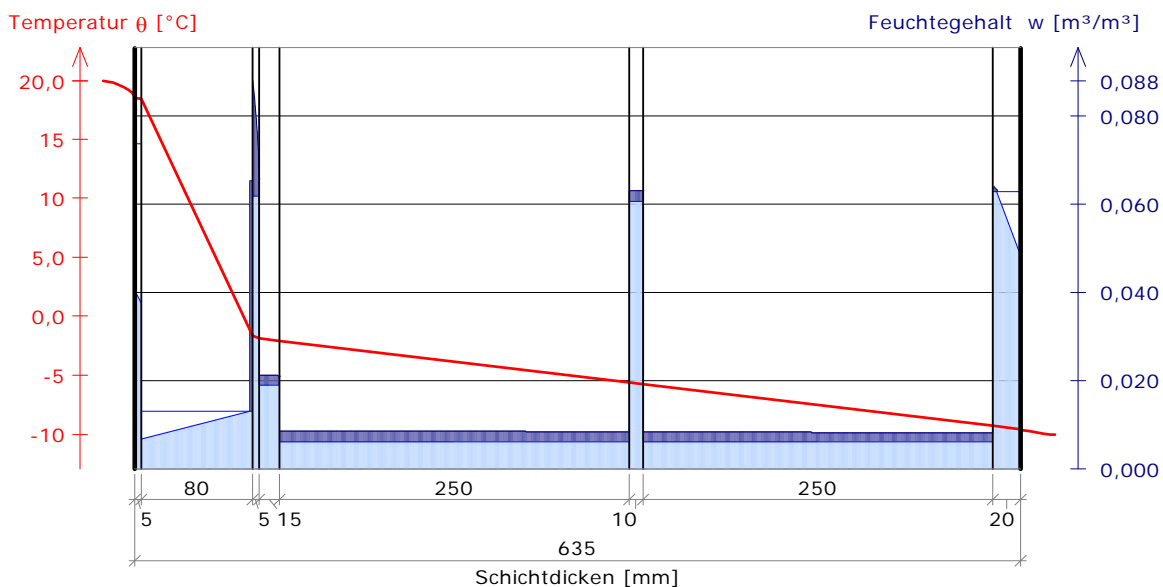
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

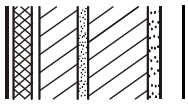
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,5	2134	1169	0,040		
				0,037		
2 Mineraldämmplatte	18,5	2124	1081	0,007		
				0,065	0,3	0,01
3 Klebemörtel	-1,6	535	535	0,088	5,0	0,09
				0,066		
4 Kalkputz (historisch)	-1,9	524	524	0,021	15,0	0,03
				0,021		
5 Altbauziegel	-2,1	515	515	0,008	250,0	0,57
				0,008		
6 Lehmörtel (historisch)	-5,6	382	382	0,063	10,0	0,02
				0,063		
7 Altbauziegel	-5,8	377	377	0,008	250,0	0,51
				0,008		
8 Kalkzementputz	-9,3	277	277	0,064	3,2	0,00
				0,048		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	271	208			
	-10	260	208			





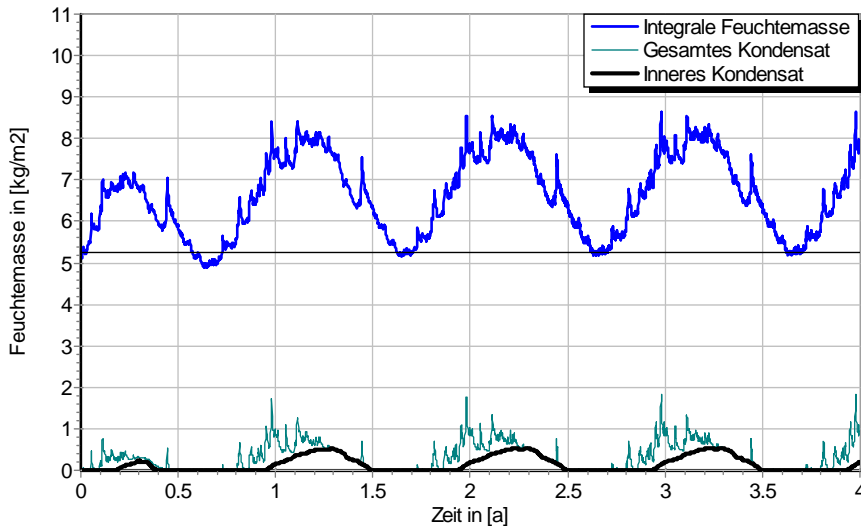
6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Nordostdeutsches Tiefland
TRY-Region 4
Referenzstandort: Potsdam



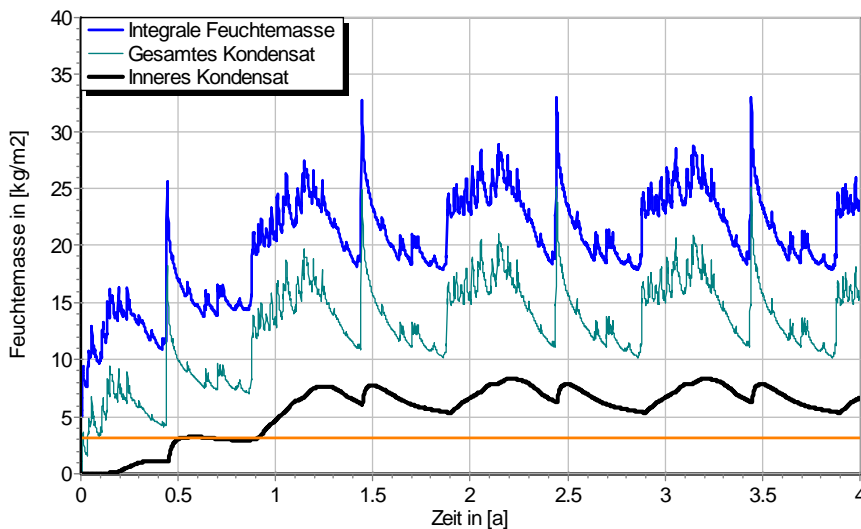
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,437	2,532	2,997	3,401
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,485	0,462	0,542



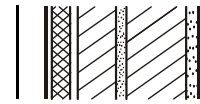
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
schlagregenexponiert,
maximales inneres
Kondensat der un-sanier-
ten Variante (2 SL) in orange

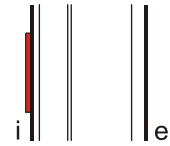
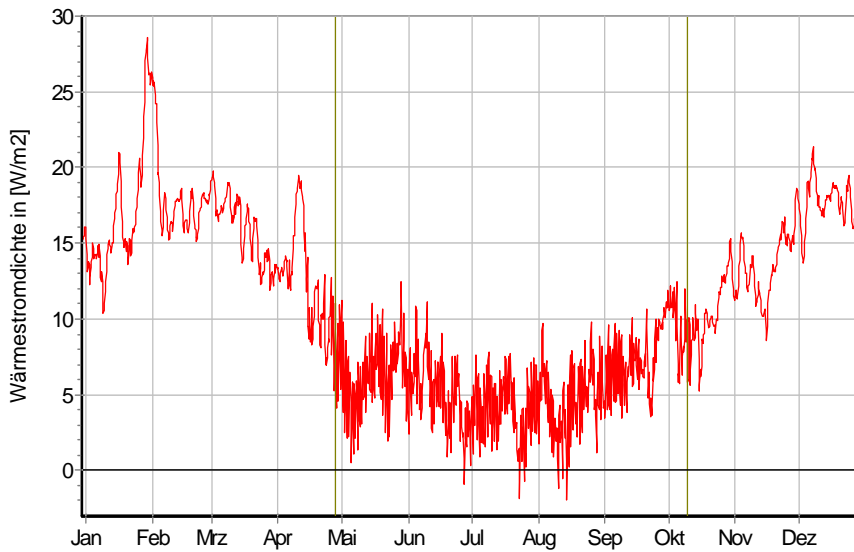
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	14,909	17,961	22,797	27,735
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	3,318	1,878*	2,751*	4,625*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineralfällplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)



5.2 Instationäre Wärmeverluste

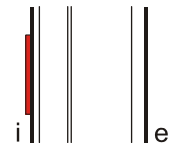
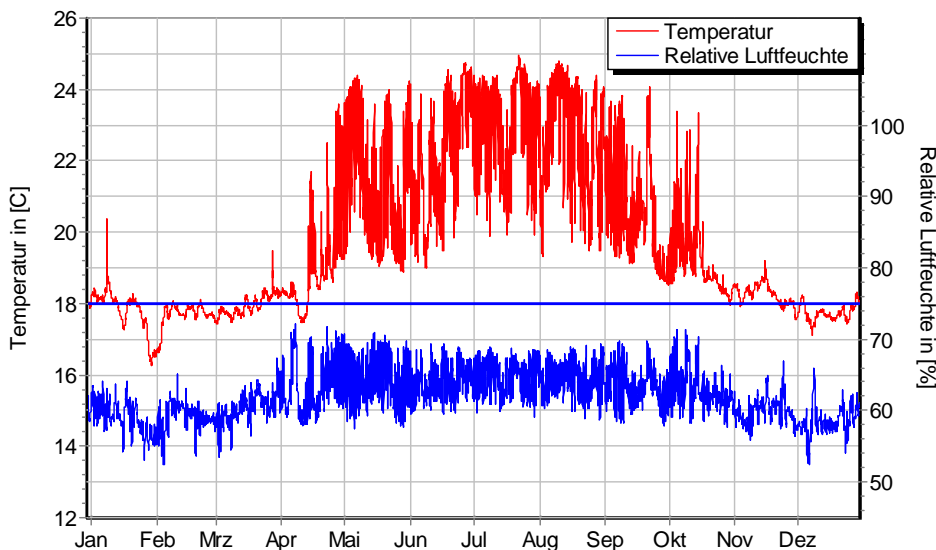


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 12. Oktober bis 26. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

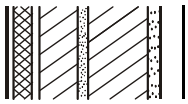
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,03	15,12	9,94	6,76
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,02	0,90	0,59	0,40
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,95	1,53	2,32

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,47	16,12	11,00	7,72
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,04	0,96	0,65	0,46
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,32	0,88	1,36	2,02

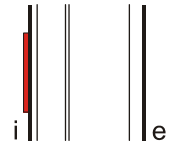
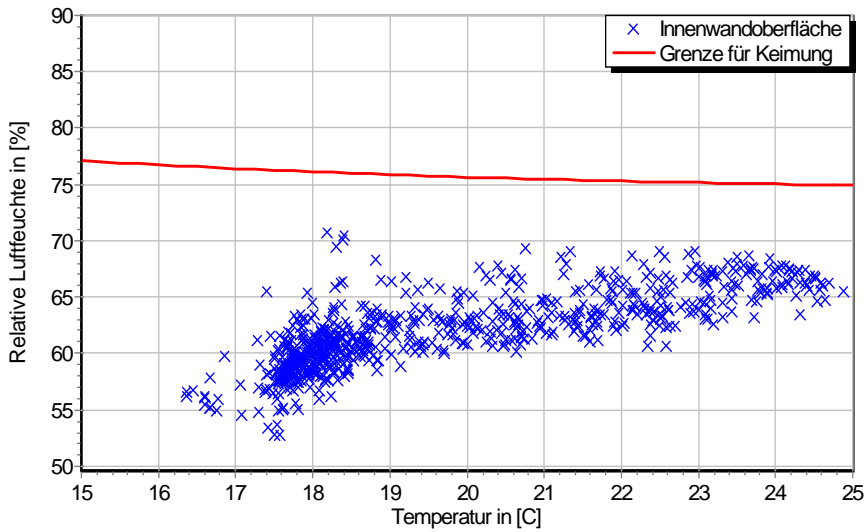
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



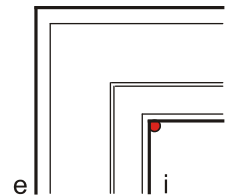
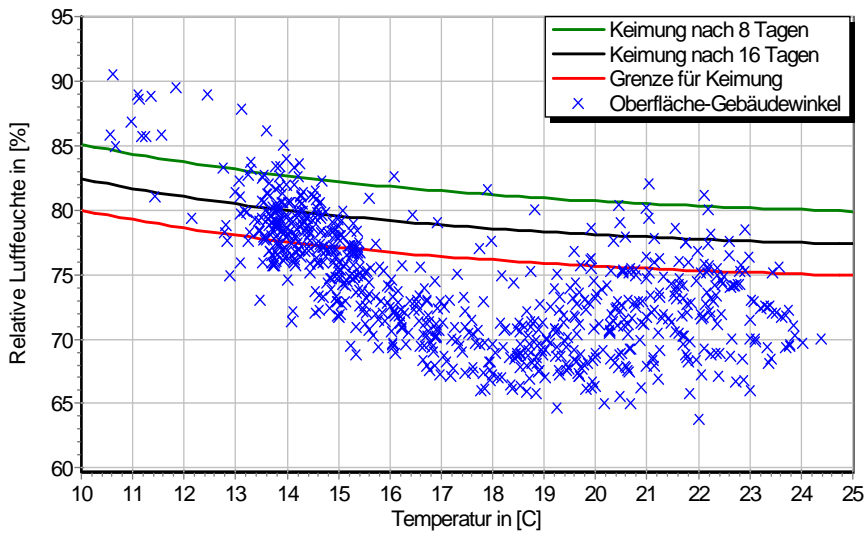
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)

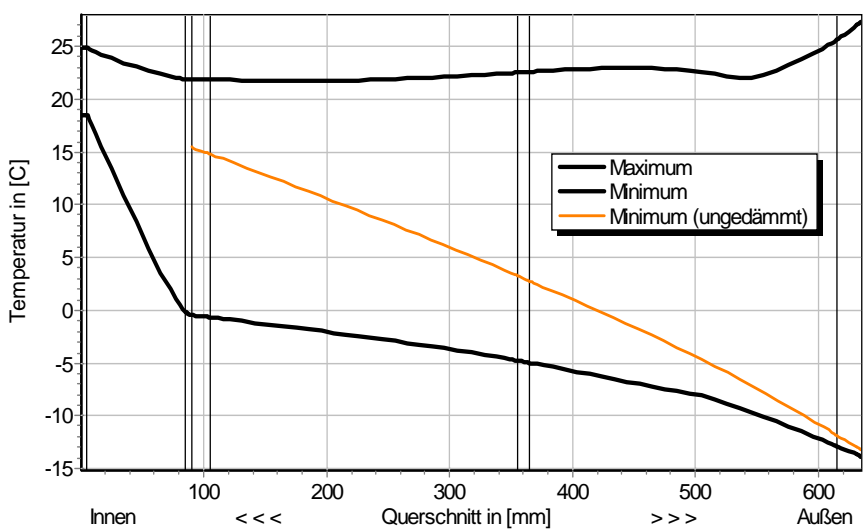


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



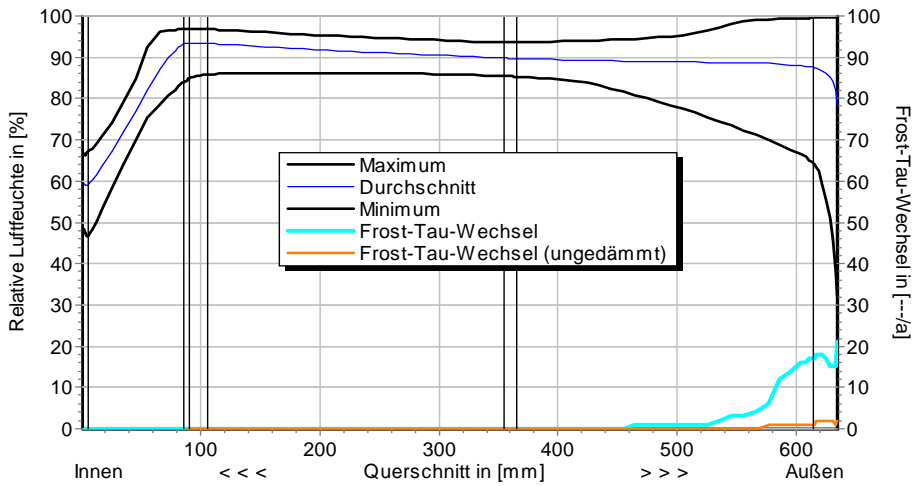
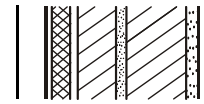
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

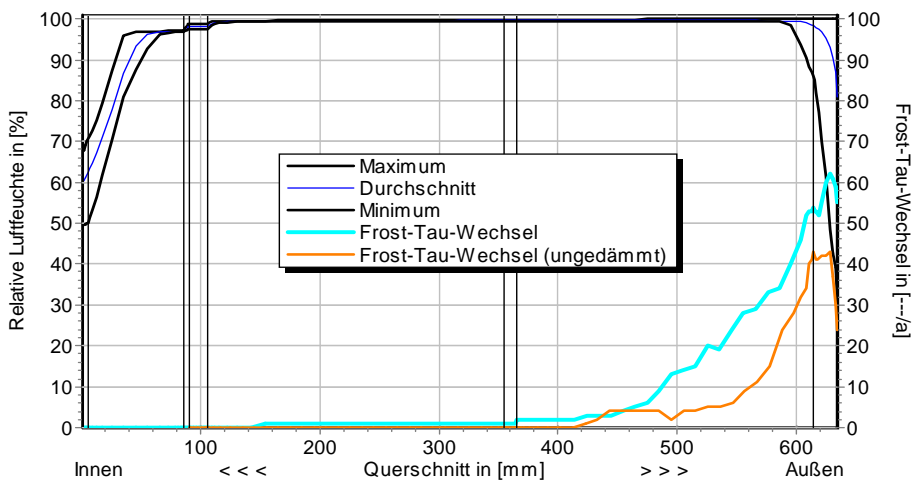


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineralfällplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)



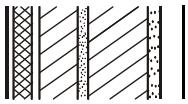
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	3	24	32	38
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,1	97,8	98,0
	WL_w	%	100	101,0	99,2	94,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	105,7	102,6	101,7
	CIL_{φ}	%	100	95,7	95,7	94,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	49	75	81	85
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	98,4	98,9	99,2
	WL_w	%	100	104,0	102,3	101,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,6	96,9	97,0
	CIL_{φ}	%	100	97,0	97,3	97,0



6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam)

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

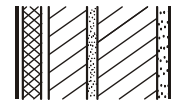
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Mit 30 mm Dämmung (1 SL) wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Mit 30 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.
- Simulation: Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm (1½ SL) gegeben. Ohne Schlagregen werden maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge zu hohe Kondensatmengen, die während der Verdunstungsperiode nicht austrocknen. Mit nur 30 mm Dämmung kann es im Gebäudewinkel zu Schimmelpilzwachstum kommen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

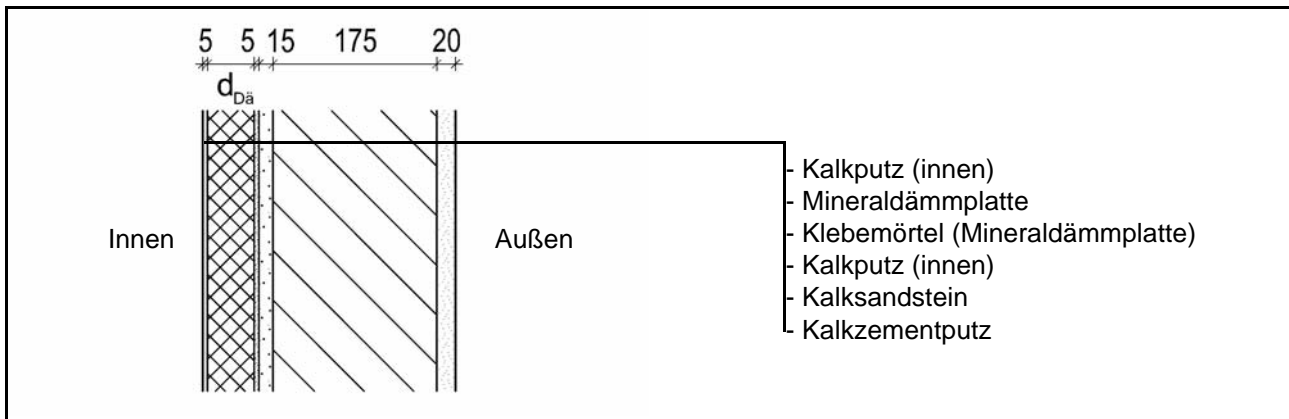
Ähnliche Konstruktionen:

- Identische Konstruktion mit Klima TRY-Region 13 - Passau: 6.1 bis 6.3

6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30, 50 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineralfällplatte	115	0,045	4,1	1,0	36,1	0,004
Klebemörtel	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalksandstein	1750	0,85	28	4,0	33,3	0,048
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,25	0,95	1,40	2,06
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,38	0,89	0,64	0,45
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	3,337	2,651	1,956
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,524	2,449	1,700
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,395	0,708	0,772	0,823

* mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

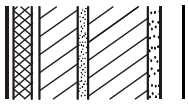
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,25	0,93	1,37	2,04
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,38	0,91	0,65	0,45
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,815	2,166	1,508
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,524	2,449	1,700
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	90,6	62,5	58,5	55,8

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	42,4	30,0	22,4	10,9



6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten

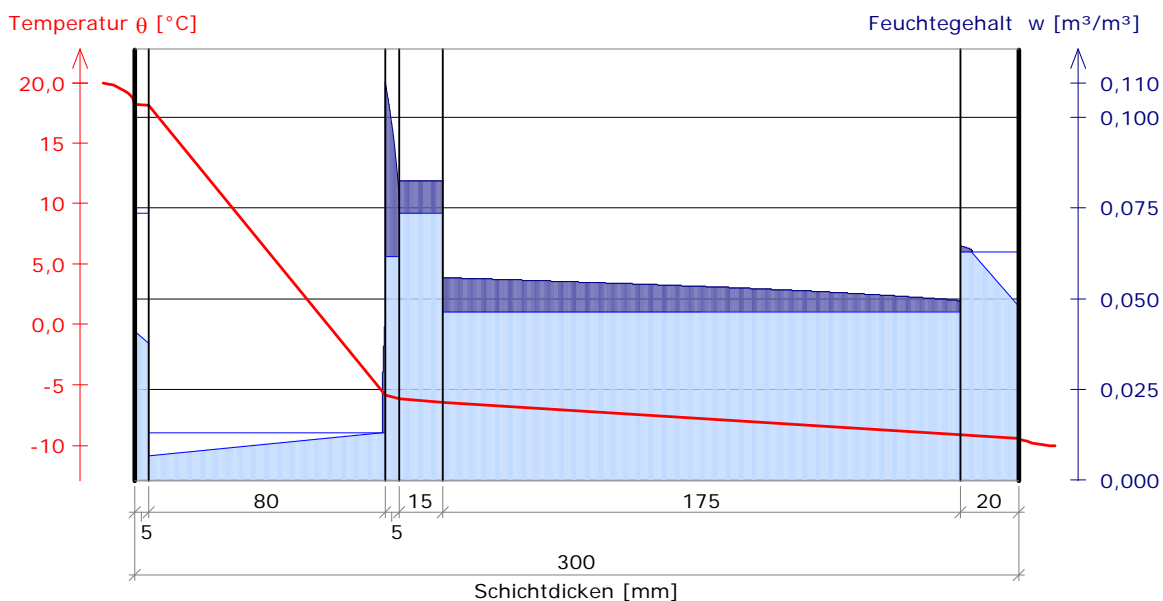
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

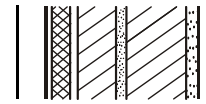
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,2	2095	1169	0,041		
	2 Mineraldämmplatte	18,1	2083	1066	0,038	
3 Klebemörtel (Mineraldämmplatte)		-5,9	373	373	0,007	1,3
	0,048				5,0	0,17
4 Kalkputz (innen)	-6,2	364	364	0,110		
				0,077	15,0	0,13
5 Kalksandstein	-6,4	356	356	0,083		
				0,082		
6 Kalkzementputz	-9,1	356	356	0,056	175,0	1,17
				0,049		
Luftschicht (Außenseite)	-9,5	281	281	0,065	4,0	0,00
				0,048		
	-10	273	208			
	-10	260	208			



6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfällplatten

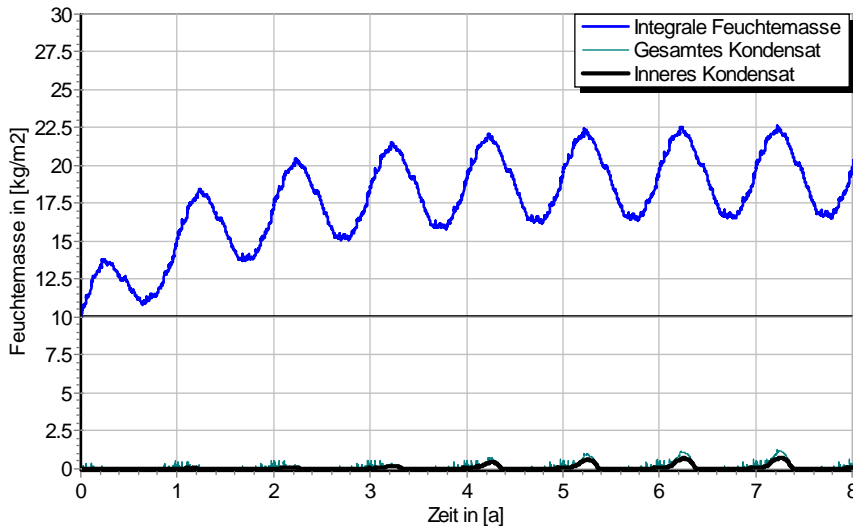


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



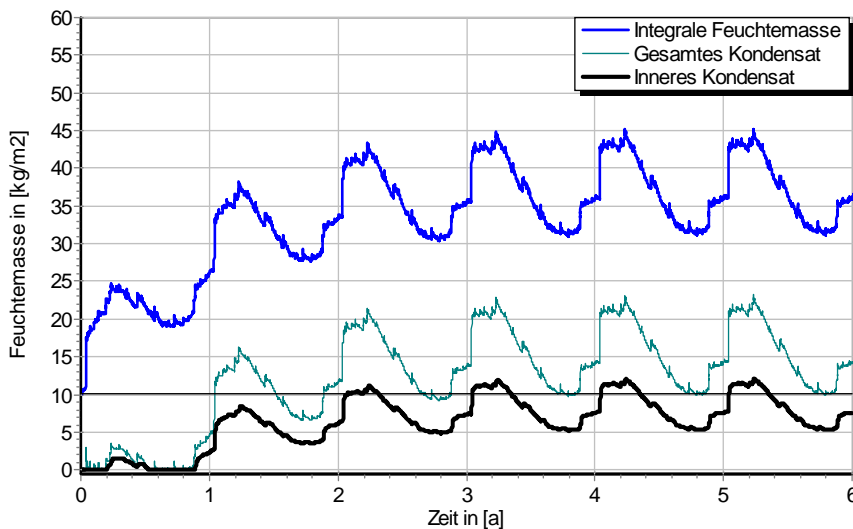
5.1 Kondensations- und Trocknungzyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

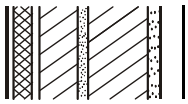
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,425	8,626	10,764	12,699
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,116	0,143	0,775



$\Delta m_{W,80}$

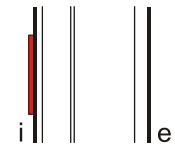
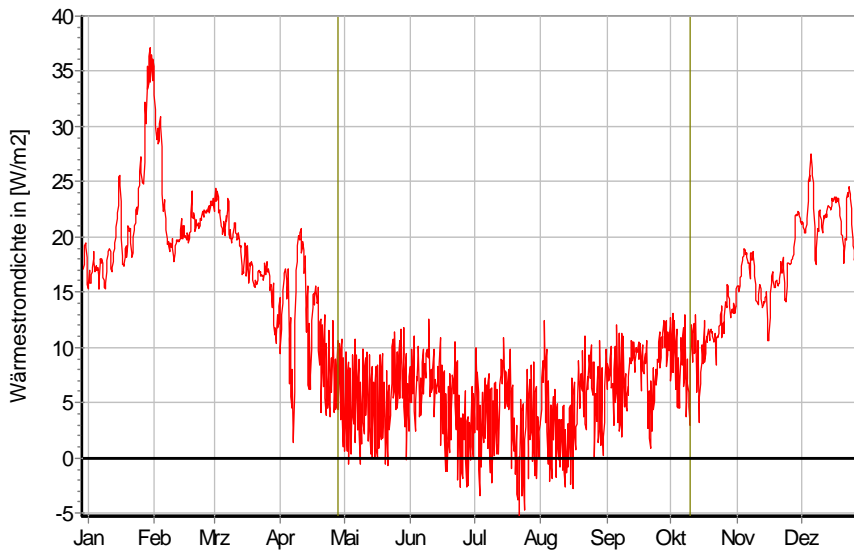
Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,942	27,586	31,82	35,121
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	8,150	10,363	12,105



6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

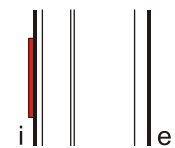
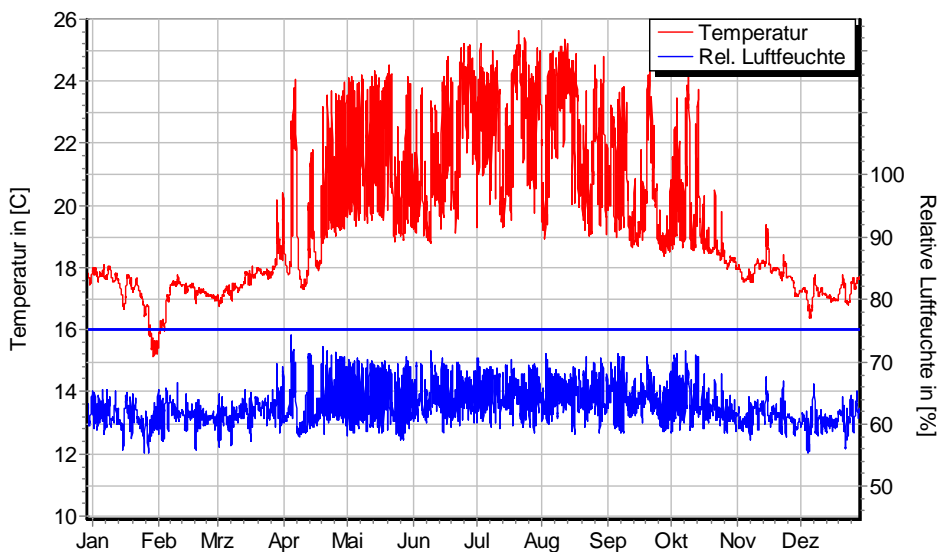


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, mit Schlagregen (West) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	43,51	16,47	11,80	8,25
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,74	0,94	0,67	0,47
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,40	0,90	1,32	1,96

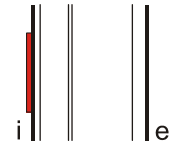
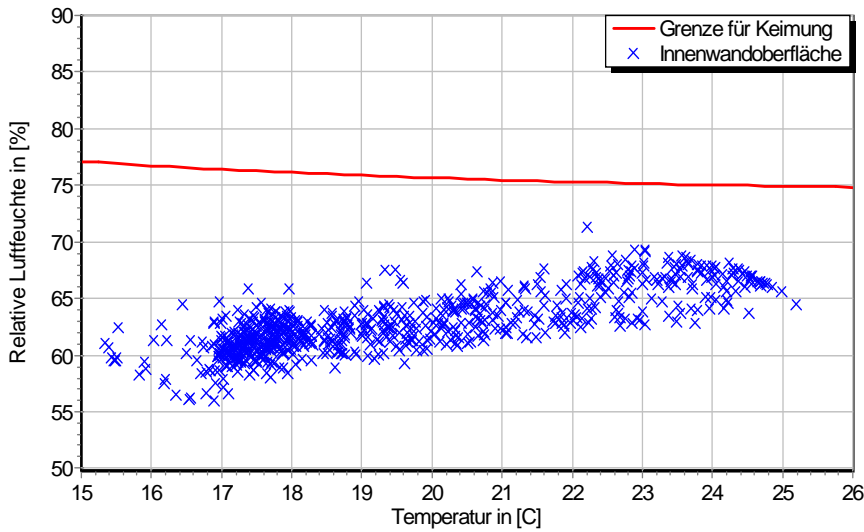
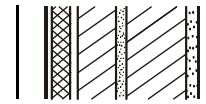
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	43,38	17,72	13,29	9,71
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,74	1,01	0,76	0,55
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,41	0,82	1,15	1,64

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

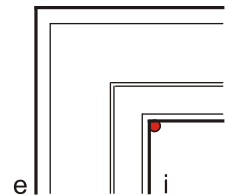
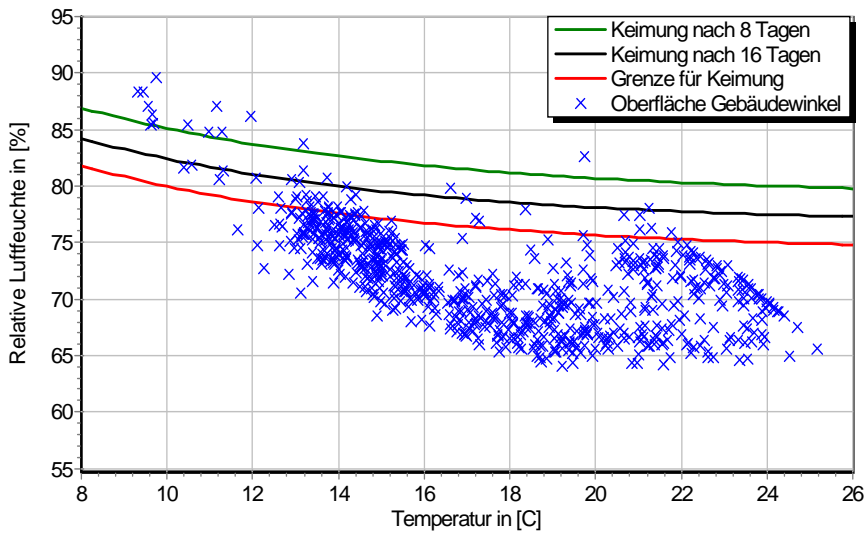


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, mit Schlagregen (West) (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)

6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

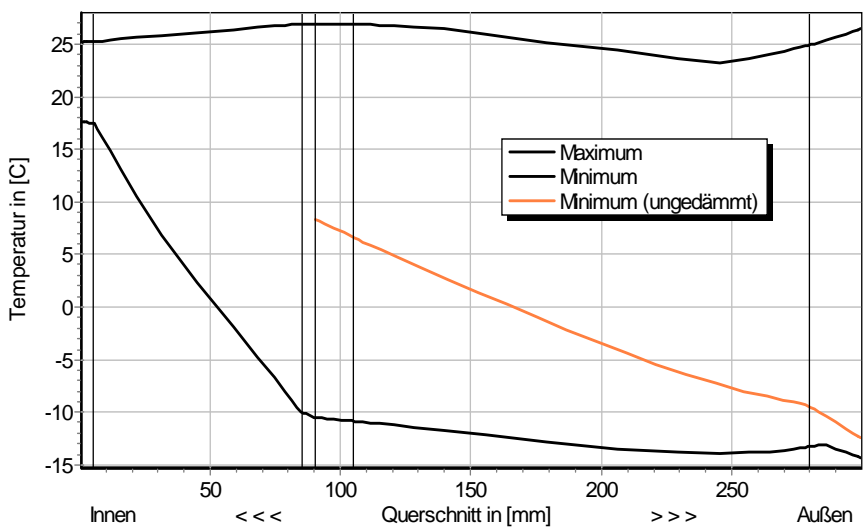


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, mit Schlagregen (West)
 (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)

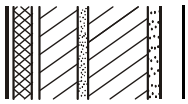


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

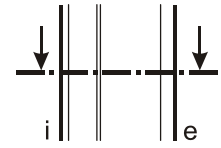
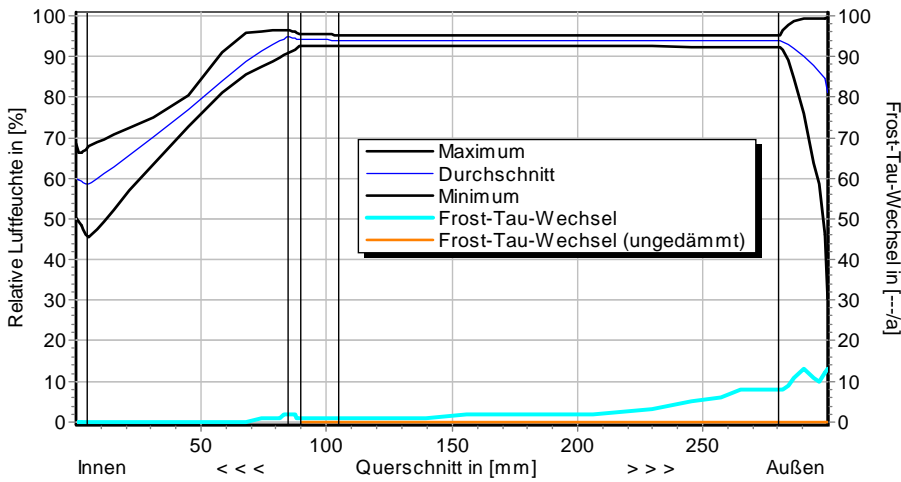
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



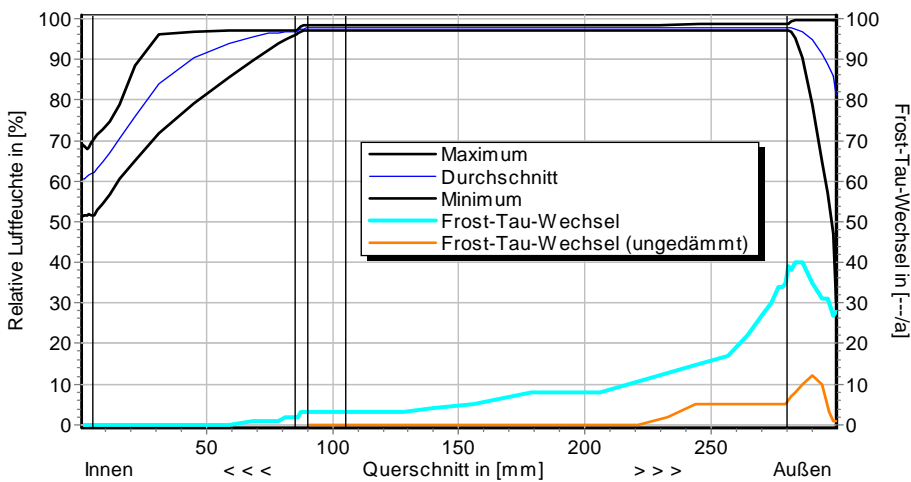
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, mit Schlagregen (West)
 (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)



6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

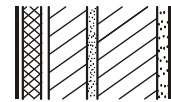


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	0	13	19	26	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,0	94,1	93,3	
	WL_w	%	100	91,0	86,2	83,3	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	107,1	106,2	105,9	
	CIL_φ	%	100	101,1	101,6	101,8	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	15	37	43	48	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,1	94,2	93,5	
	WL_w	%	100	107,6	109,3	110,5	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,7	95,7	94,6	
	CIL_φ	%	100	116,5	116,0	114,9	

6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineralfällmplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)		Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz		$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)		Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

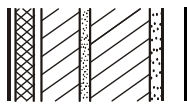
8 Schlussfolgerungen

- DIN:** Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm Dämmung gegeben.
- COND:** Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm Dämmung gegeben.
- Simulation:** Ohne Schlagregenexponierung wird der Mindestwärmeschutz ab 50 mm eingehalten, Kondensatmengen und Verdunstung sind unkritisch. Bei großen eindringenden Schlagregenmengen wird die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung des Kondensats nicht eingehalten. 50 mm Dämmung sind hinsichtlich des Mindestwärmeschutz nicht ausreichend. Schimmelpilzwachstum ist ab 50 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

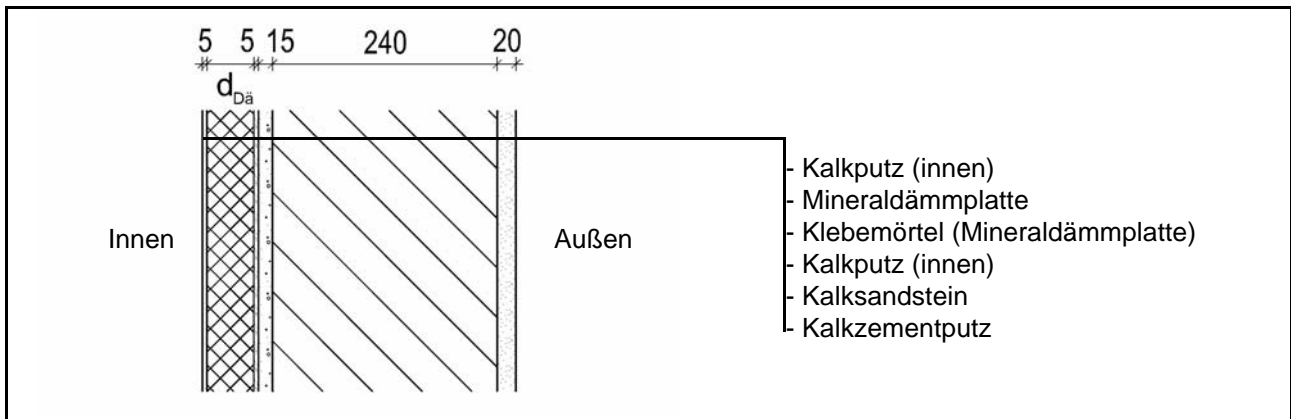
Ähnliche Konstruktionen:

-



6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30, 50 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Mineralfüllplatte	115	0,045	4,1	1,0	36,1	0,004
Klebemörtel	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Kalksandstein	1750	0,85	28	4,0	33,3	0,048
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

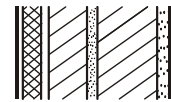
	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,03	1,47	2,14
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,01	0,84	0,61	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,989	2,493	1,888
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,493	2,419	1,670
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,442	0,720	0,779	0,827

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,01	1,45	2,12
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,01	0,85	0,62	0,44
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	2,472	1,983	1,396
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	3,493	2,419	1,670
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,4	61,5	58,1	55,6
Innendämmsystem:			** feuchteabhängig			
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,24	0,33	0,45
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,70	1,14	1,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	42,4	30,0	22,4	10,9

6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten



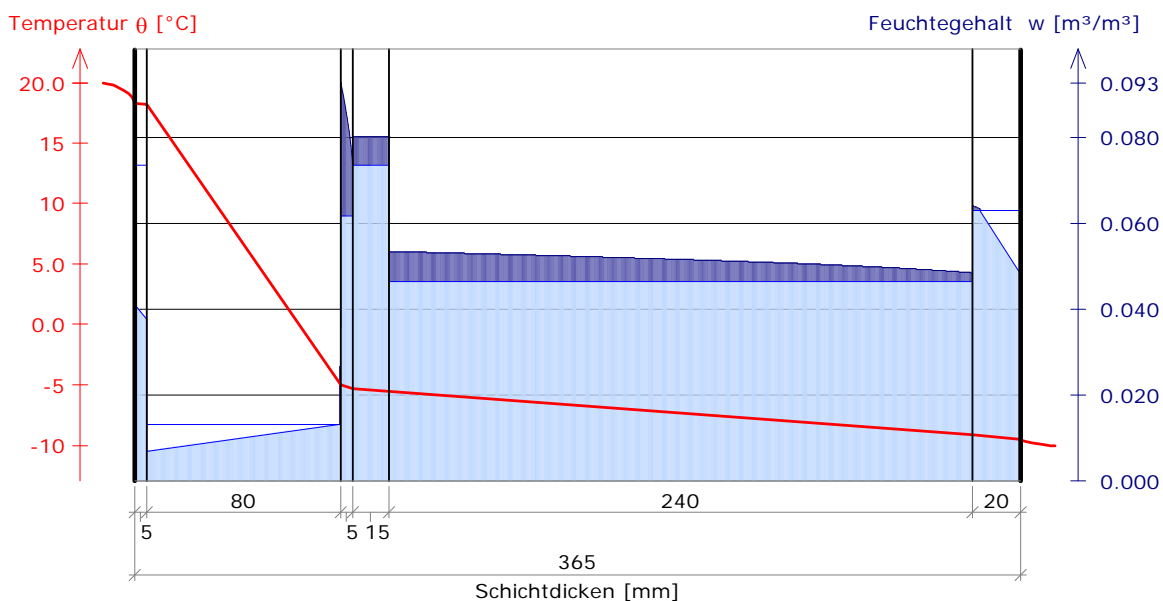
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

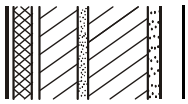
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20.0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18.3	2103	1169	0.041		
				0.038		
2 Mineraldämmplatte	18.2	2091	1070	0.007		
				0.036	1.1	0.02
3 Klebemörtel (Mineraldämmplatte)	-5.0	401	401	0.093		
				0.073	5.0	0.11
4 Kalkputz (innen)	-5.3	391	391	0.080		
				0.080	15.0	0.10
5 Kalksandstein	-5.6	383	383	0.053		
				0.048	240.0	1.17
6 Kalkzementputz	-9.1	280	280	0.064		
				0.048	3.3	0.00
Luftschicht (Außenseite)	-9.5	272	208			
	-10	260	208			





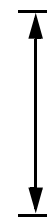
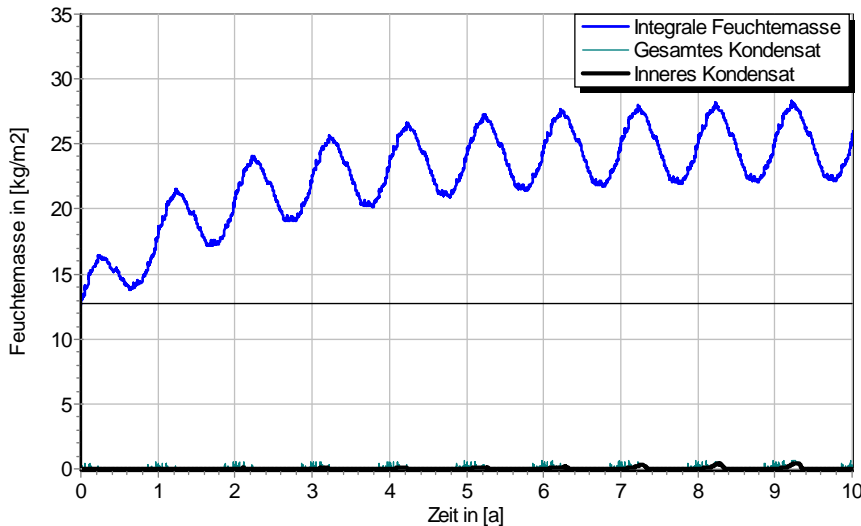
6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



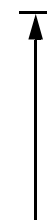
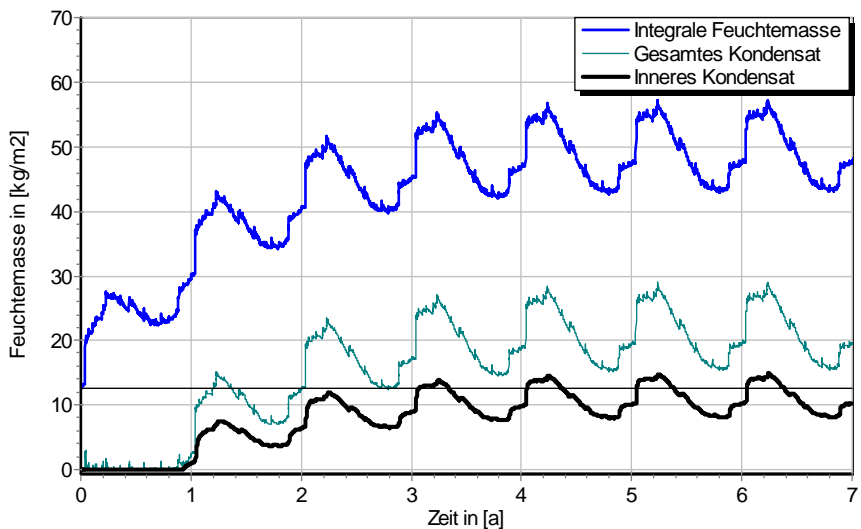
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,107	9,332	12,742	15,795
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,078	0,109	0,554



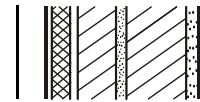
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

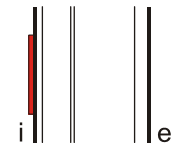
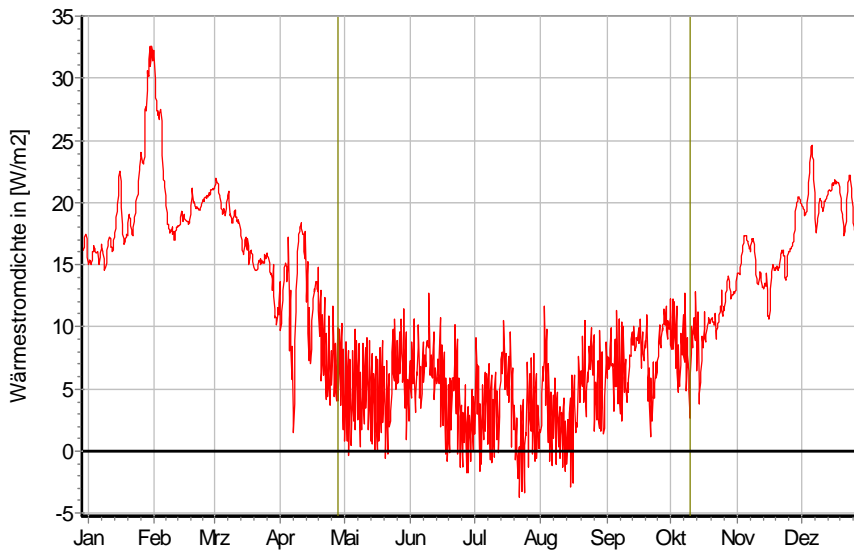
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,624	34,773	40,476	44,573
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	9,899	12,863	14,956

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

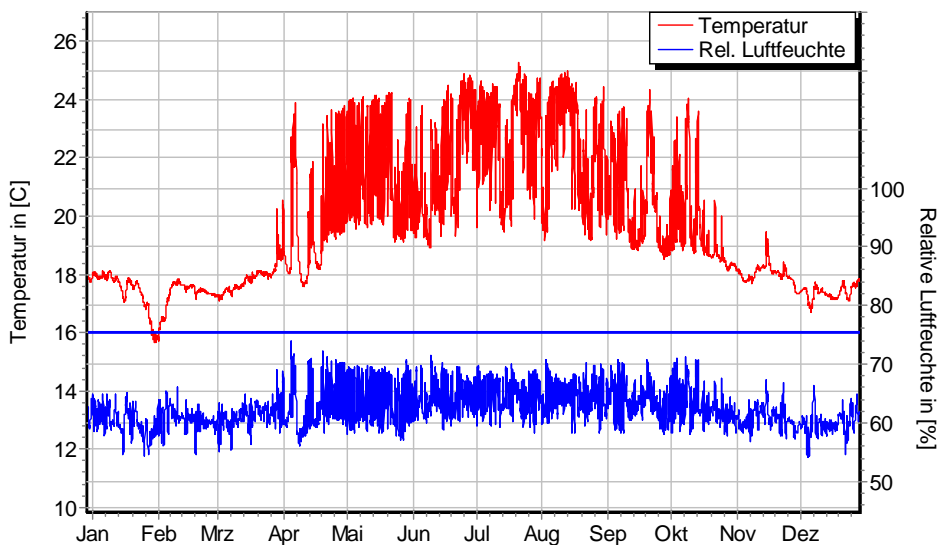


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, mit Schlagregen (West) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)

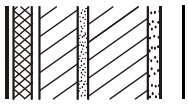
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,74	15,24	11,12	7,92
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,54	0,87	0,63	0,45
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	0,98	1,41	2,05

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,73	16,37	12,57	9,35
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,54	0,93	0,71	0,53
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,78	0,90	1,23	1,71

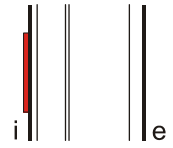
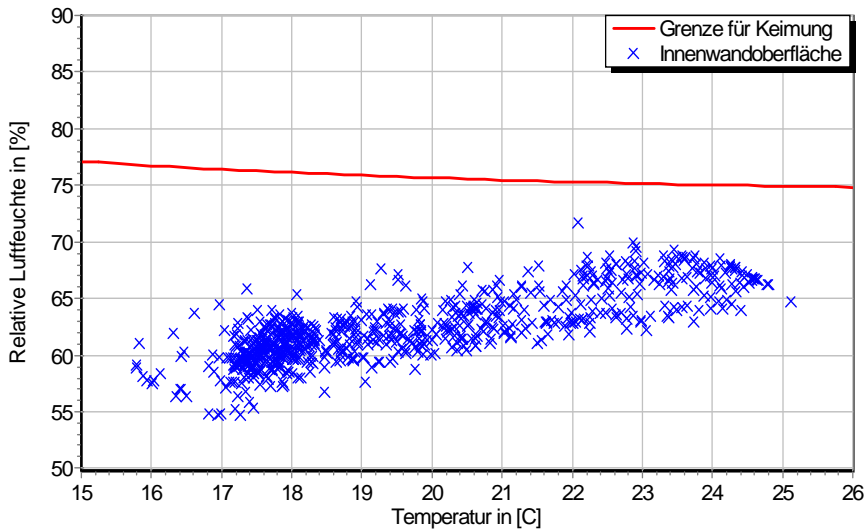
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



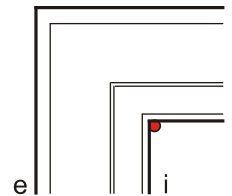
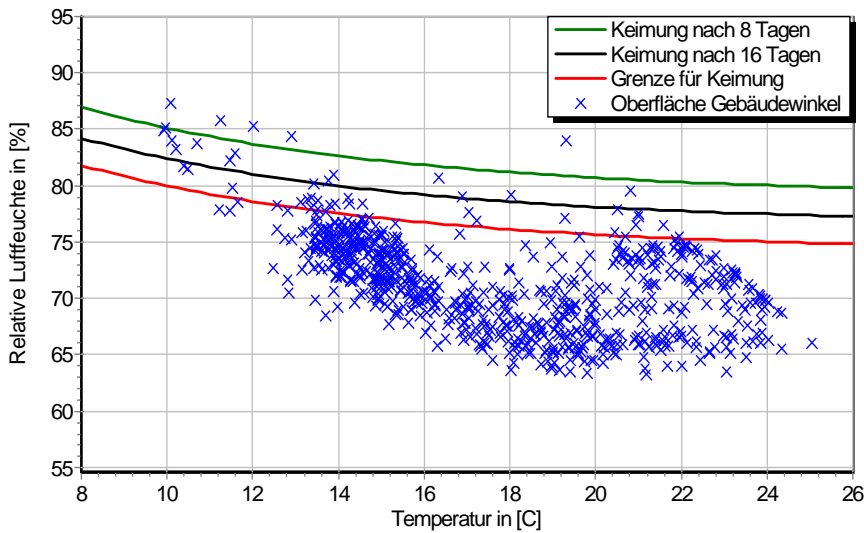
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, mit Schlagregen (West) (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)



6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfüllplatten

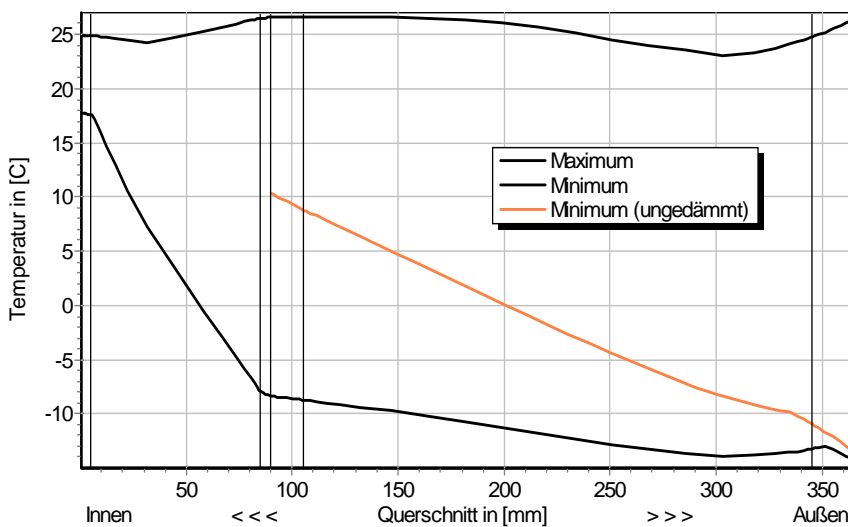


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, mit Schlagregen (West)
 (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)



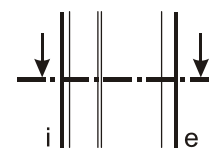
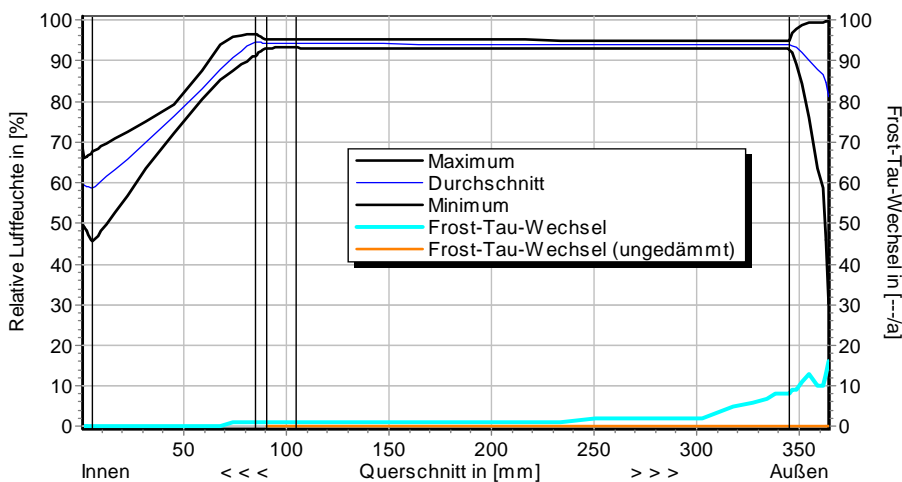
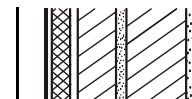
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

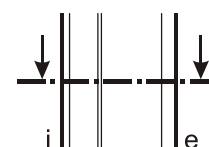
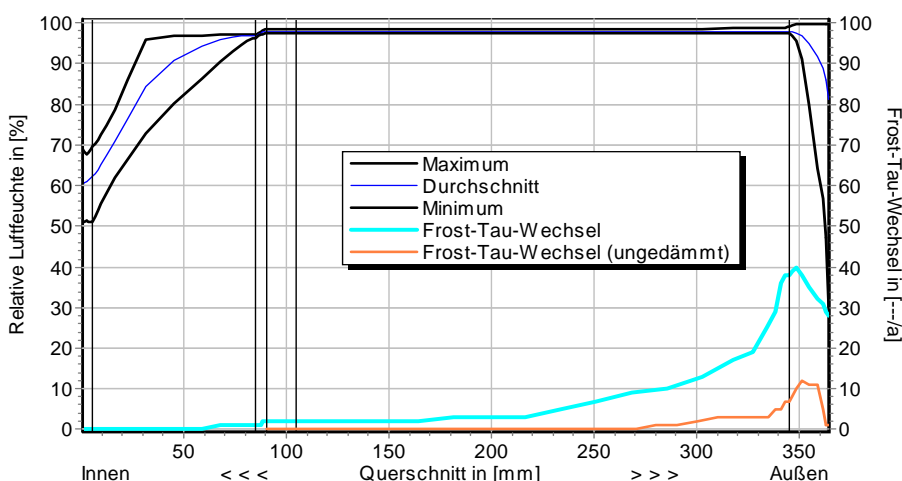


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, mit Schlagregen (West)
 (Verlauf ohne Schlagregen sehr ähnlich)

6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfällmplatten



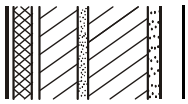
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	0	15	20	27	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,6	95,8	95,1	
	WL_w	%	100	91,5	86,9	83,9	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	104,4	104,0	103,8	
	CIL_φ	%	100	101,2	101,5	101,4	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	38	43	48	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,3	95,5	94,9	
	WL_w	%	100	106,5	107,9	109,0	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,8	96,0	95,7	
	CIL_φ	%	100	112,0	111,1	110,3	



6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineralfällmplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
Schlagregenexponiiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

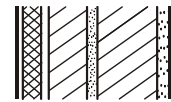
- DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Der Mindestwärmeschutz ist ab 30 mm Dämmung gegeben.
- COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Der Mindestwärmeschutz ist ab 30 mm Dämmung gegeben.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird jeweils ab 50 mm erfüllt, Kondensatmengen und Verdunstung sind unkritisch. Bei großen eindringenden Schlagregenmengen werden die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung des Kondensats nicht eingehalten. Schimmelpilzwachstum ist ab 50 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

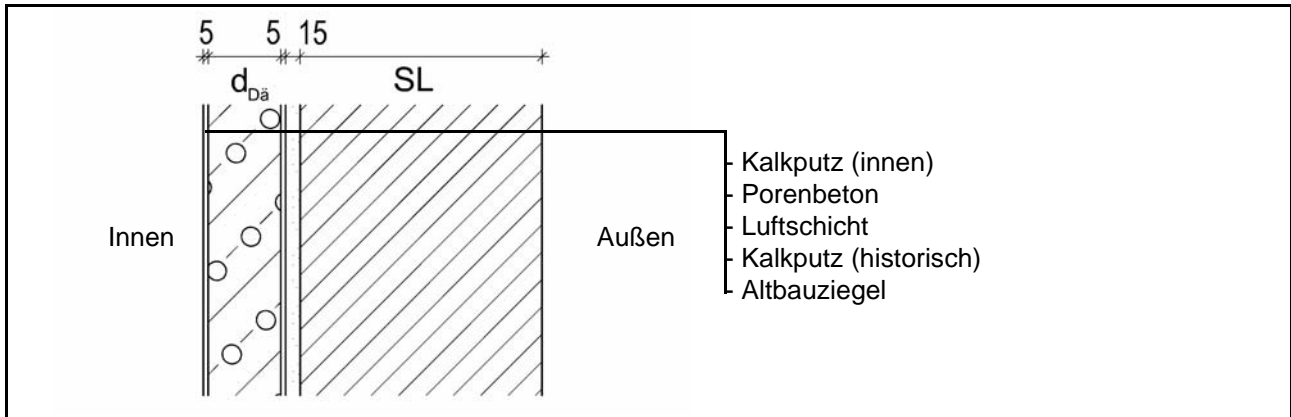
Ähnliche Konstruktionen:

-

7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Porenbetonsteine $d_{D\ddot{a}}$ = 75mm/1 SL, 100mm/1½ SL, 115mm/2 SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Porenbetonstein	390	0,10	7,4	1,5	70,0	0,064
Luftschicht*	1,3	DIN 6946	$\mu = f(\text{Konv.})$	-	-	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

* λ und μ gemäß DIN 6946 bzw. Konvektionsverhältnissen

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115 mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,20	1,61	1,92
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,73	0,56	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,874	0,625	0,501
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	1,257	0,940	0,803
Temperaturfaktor** (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,712	0,756	0,780

** mit $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

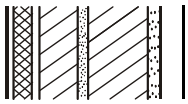
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115 mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand***	R	m ² ·K/W	0,33	1,20	1,61	1,92
Wärmedurchgangskoeffizient***	U	W/m ² ·K	2,00	0,73	0,56	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,747	0,526	0,395
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	1,257	0,940	0,803
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	59,8	57,3	56,2

Innendämmsystem:

*** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,61	0,80	0,91
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,87	1,12	1,27
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	17,4	13,4	13,4



7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt

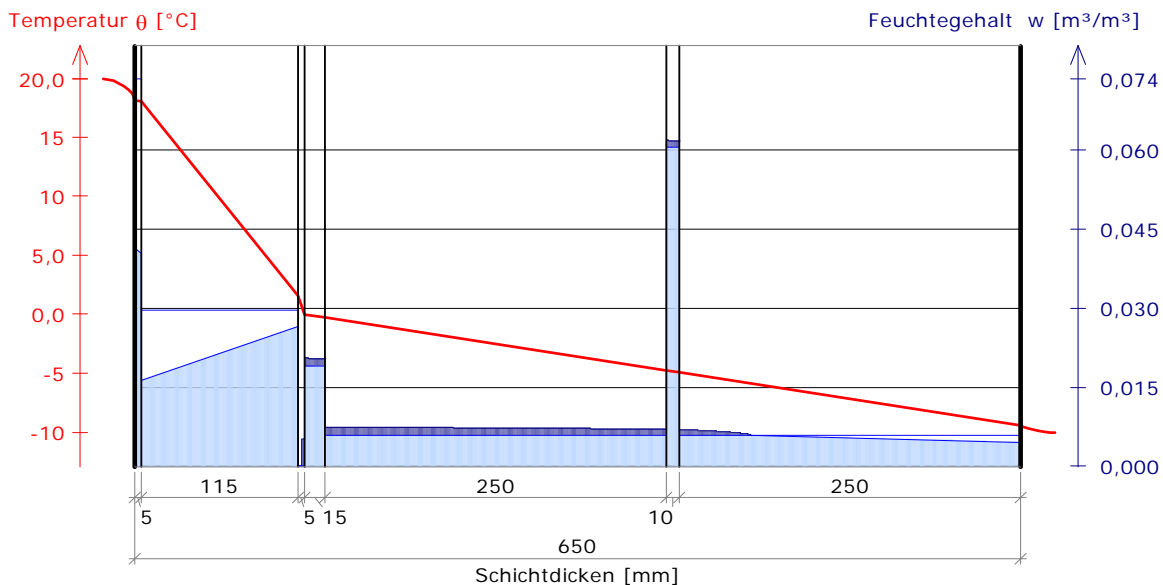
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier, 1SL		75mm, 1SL		100mm, 1½SL		115mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

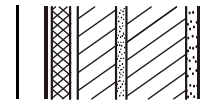
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 115 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20.0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18.1	2082	1169	0.041		
				0.040		
2 Porenbeton	18.0	2070	1135	0.016		
				0.027		
3 Luftschicht 5 mm (vertikal)	1.5	683	613	0.000		
4 Kalkputz (historisch)	0.0	611	611	0.005	0.0	0.00
				0.020	15.0	0.02
5 Altbauziegel	-0.3	598	598	0.007	250.0	0.33
				0.007		
6 Lehmörtel (historisch)	-4.8	410	410	0.062	10.0	0.01
				0.062		
7 Altbauziegel	-4.9	404	404	0.007	51.8	0.04
				0.005		
Luftschicht (Außenseite)	-9.4	273	208			
	-10	260	208			



7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt

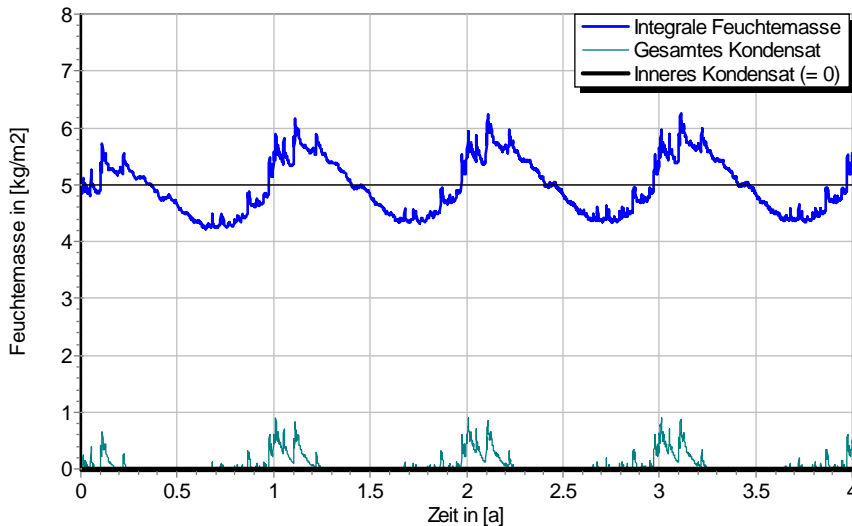


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



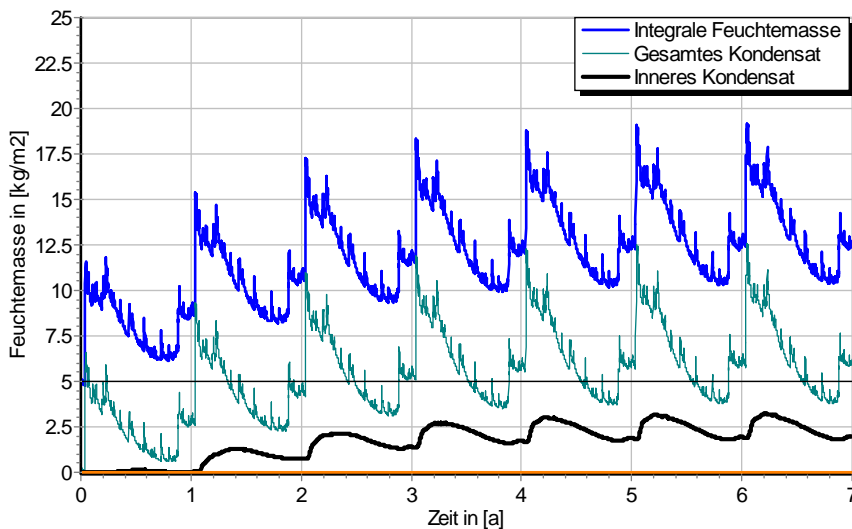
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 115 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	75 mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	1,184	1,192	1,249
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,509	0,043	0,0

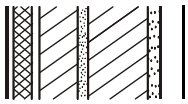


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 115 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante (2 SL) in orange

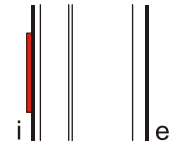
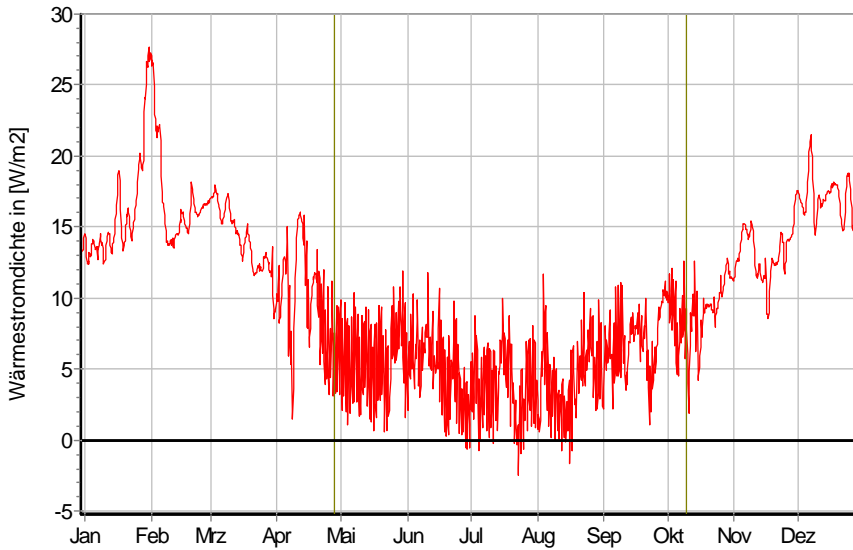
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	75 mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	8,870	11,676	14,183
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	2,720*	1,897*	3,284*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt

5.2 Instationäre Wärmeverluste

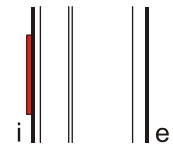
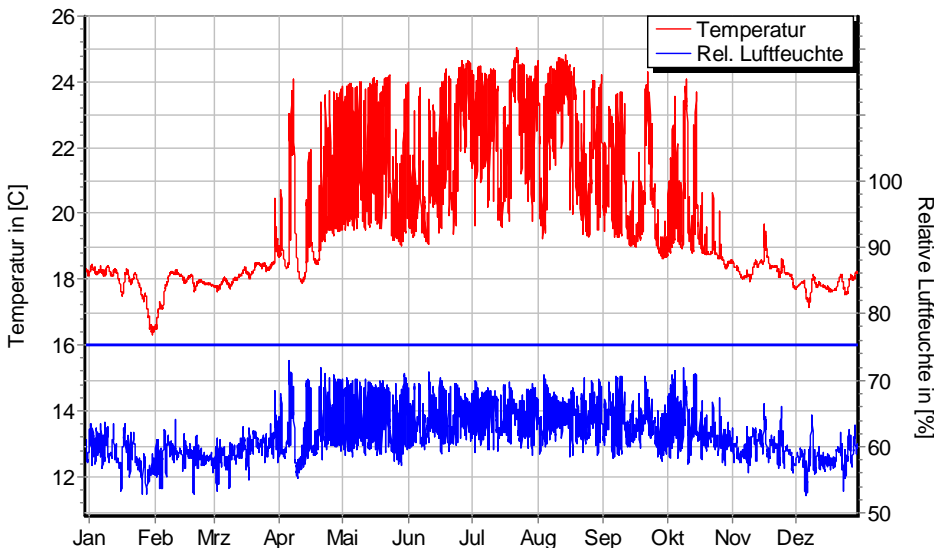


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 75 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	75 mm, 1 SL	100 mm, 1½ SL	115 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	13,85	10,59	8,99
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,07	0,79	0,60	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,31	1,10	1,49	1,79

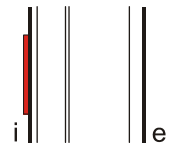
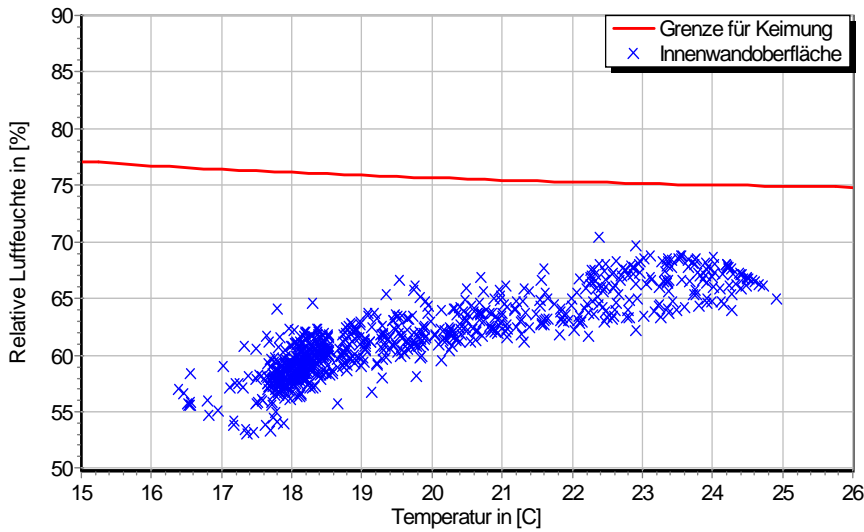
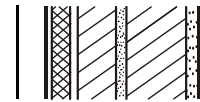
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	75 mm, 1 SL	100 mm, 1½ SL	115 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	13,72	10,63	9,04
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,05	0,78	0,60	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,32	1,11	1,49	1,77

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

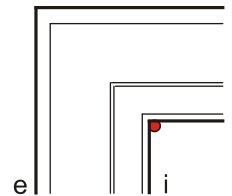
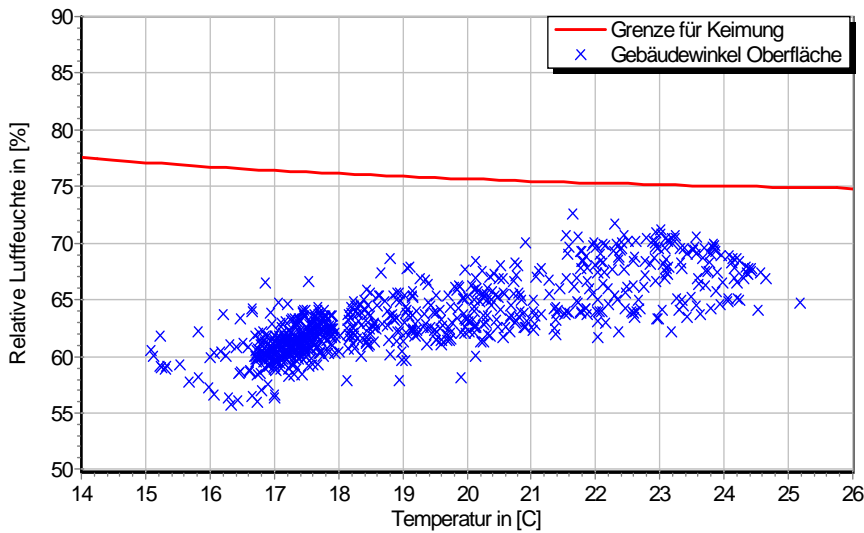


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 75 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt

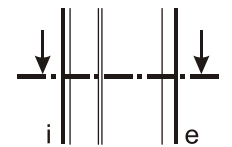
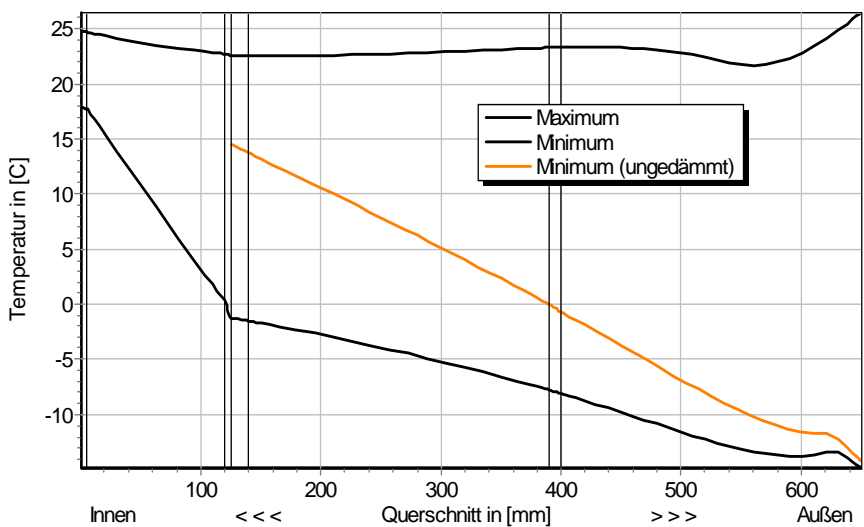


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 75 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

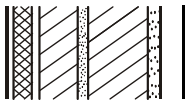


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 75 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

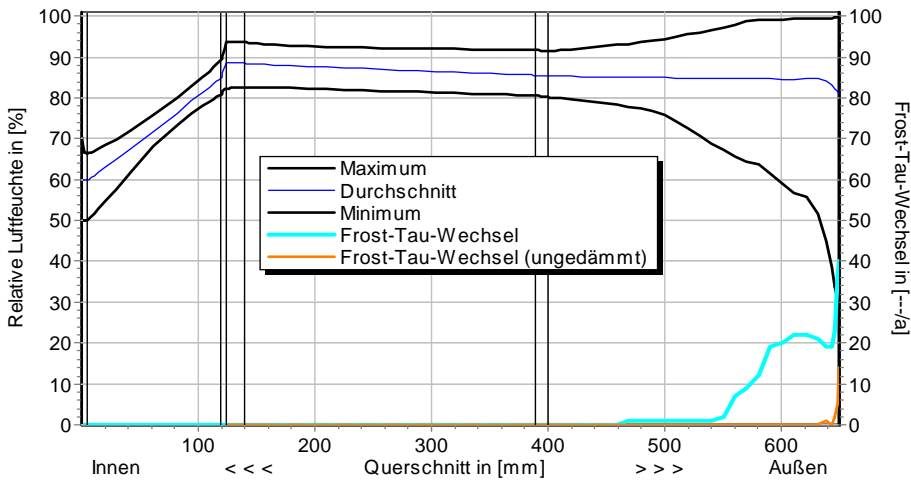
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



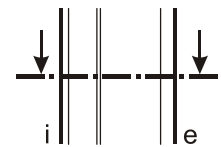
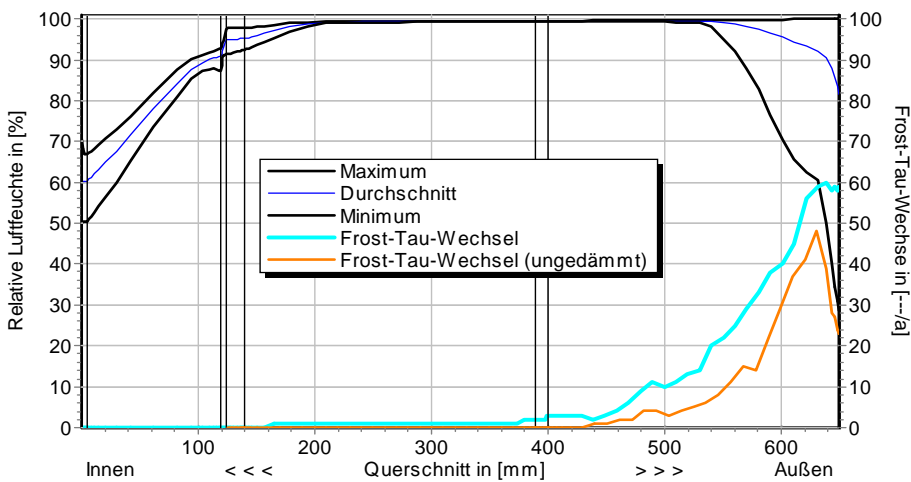
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 115 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 115 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

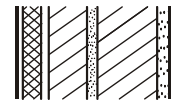


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 115 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	31	38	40
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,3	95	95,7
	WL_w	%	100	111,3	124,2	122,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,2	97,1	97,6
	CIL_φ	%	100	94,1	94,4	94,6
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	57	63	66
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,3	96,5	97,1
	WL_w	%	100	119,0	117	112,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	93,1	95,7	97,3
	CIL_φ	%	100	99,1	97,8	96,7

7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✓	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	75mm,1SL	100mm,1½SL	115mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

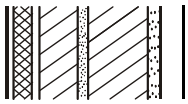
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Keine Variante erfüllt die DIN-Kriterien wegen zu hoher Kondensatmengen. Der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- COND: Nur mit 115 mm Porenbetonsteinen (2 SL) wird die zulässige Kondensatmenge unterschritten. Der Mindestwärmeschutz wird immer erfüllt.
- Simulation: Die gedämmten Konstruktionen ab 100 mm Dämmung (1½ SL) ohne Schlagregeneinfluss erfüllen alle Kriterien. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge bilden sich in den gedämmten Konstruktionen zu hohe Kondensatmengen und die Verdunstung des Kondensats ist ab einer Porenbetonsteindicke von 100 mm nicht gewährleistet. Bei allen gedämmten Varianten ist kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 100 bzw. 115 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

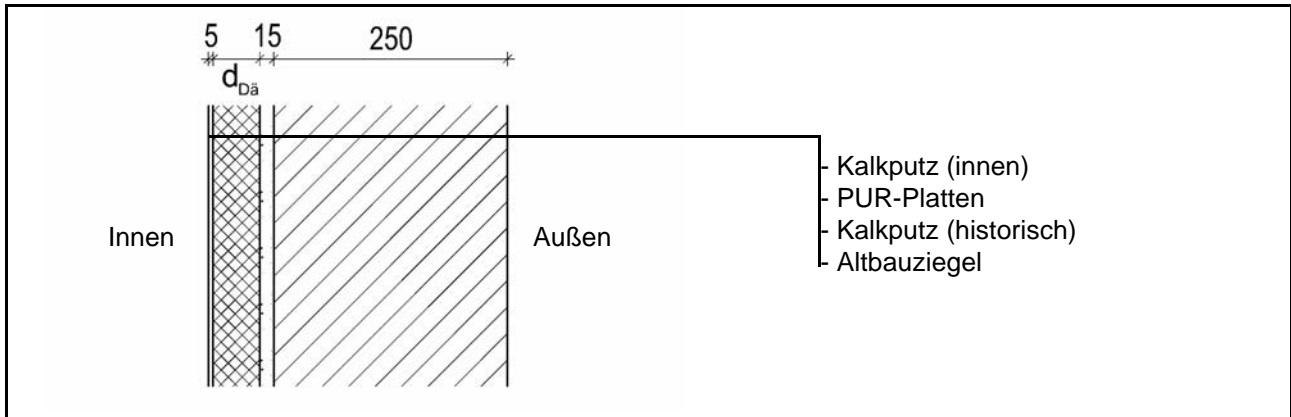
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3



8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_W
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

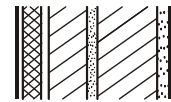
	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,41	2,12	3,19
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,63	0,44	0,30
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,102	0,066	0,039
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,467	0,389	0,344
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,46	0,778	0,833	0,874

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,41	2,12	3,19
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,63	0,44	0,30
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,074	0,040	0,013
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,467	0,389	0,344
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{Si}	%	82,1	58,3	55,6	53,7
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,06	5,06	8,06
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	1,08	1,79	2,86
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	23,5	9,6

8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



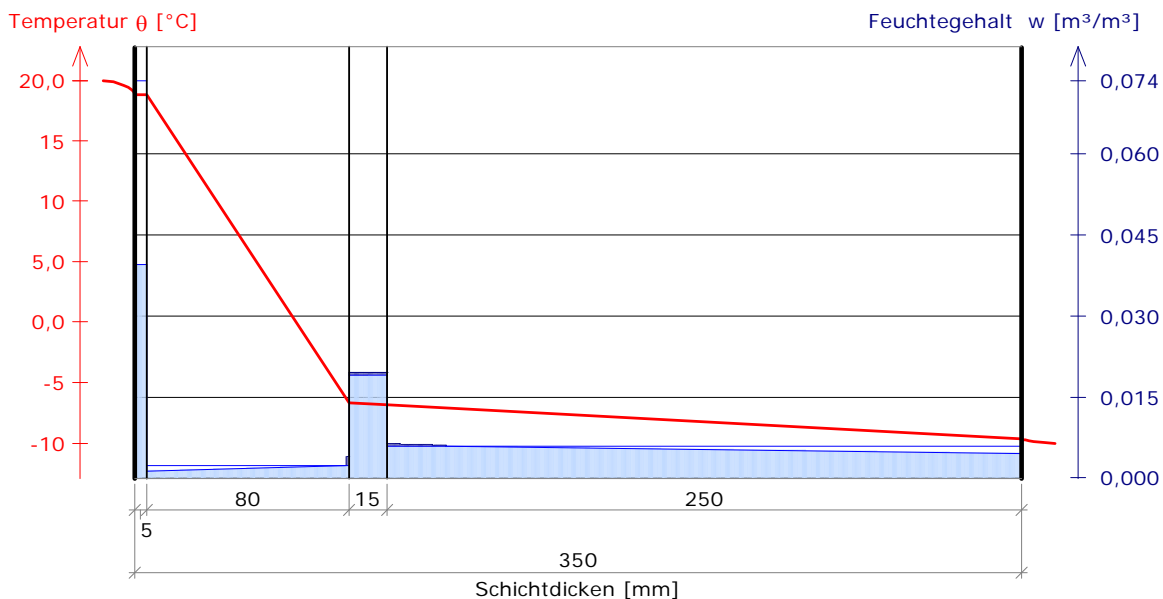
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

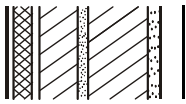
	Bedingung	Unsanirt		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,8	2176	1169	0,040		
				0,040		
2 Polyurethanplatten	18,8	2168	1163	0,001		
3 Kalkputz (historisch)	-6,7	347	347	0,004	0,0	0,00
				0,019	15,0	0,01
4 Altbauziegel	-6,9	342	342	0,019		
				0,006	23,4	0,01
Luftschicht (Außenseite)	-9,6	268	208	0,005		
	-10	260	208			





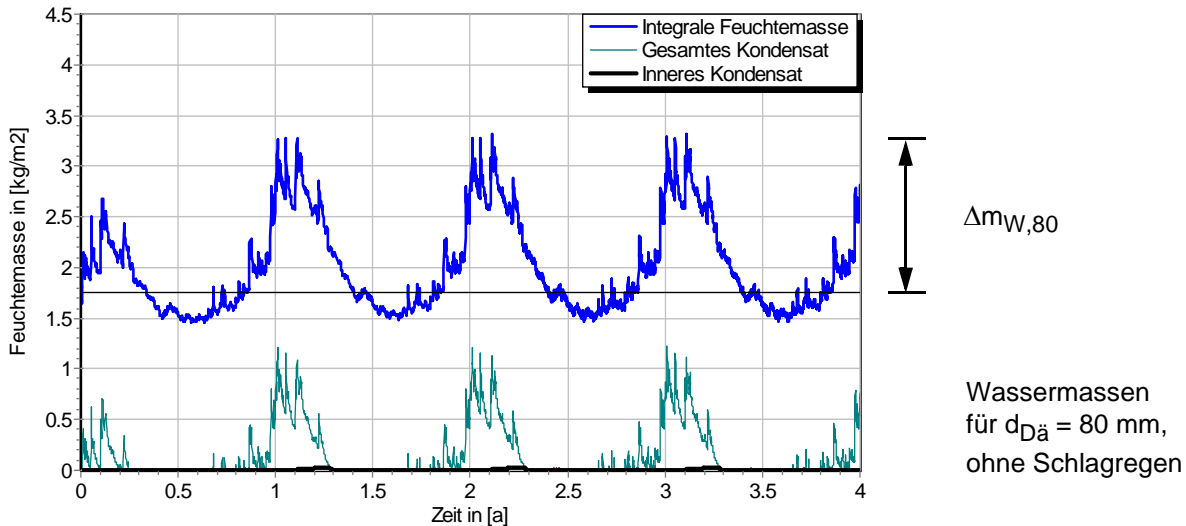
8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

5 Simulationsergebnisse

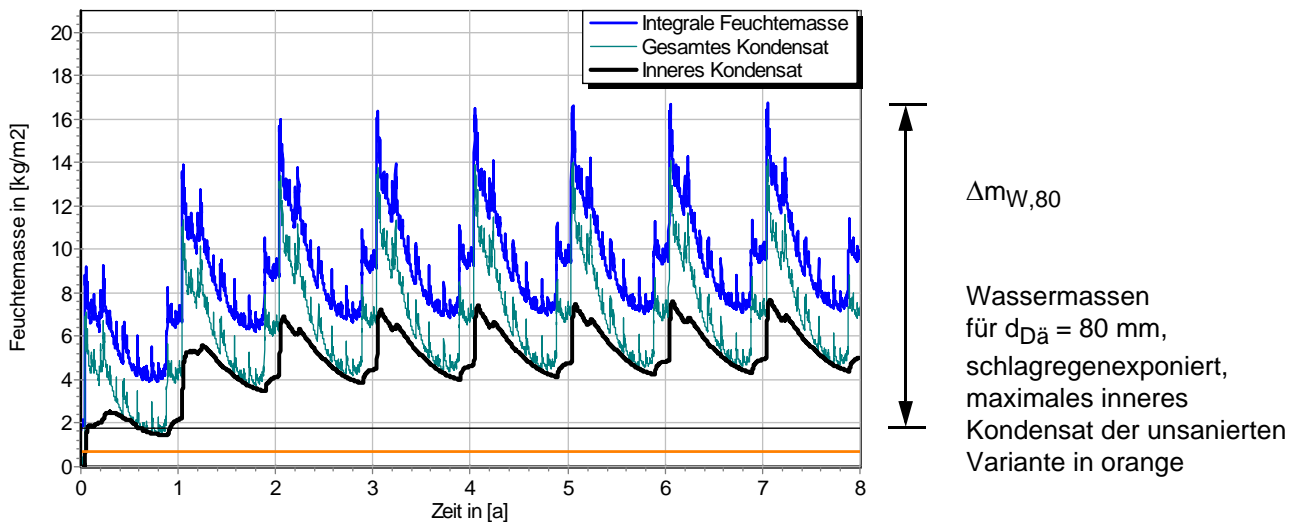
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



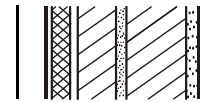
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,867	1,200	1,565
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,006	0,030



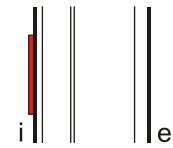
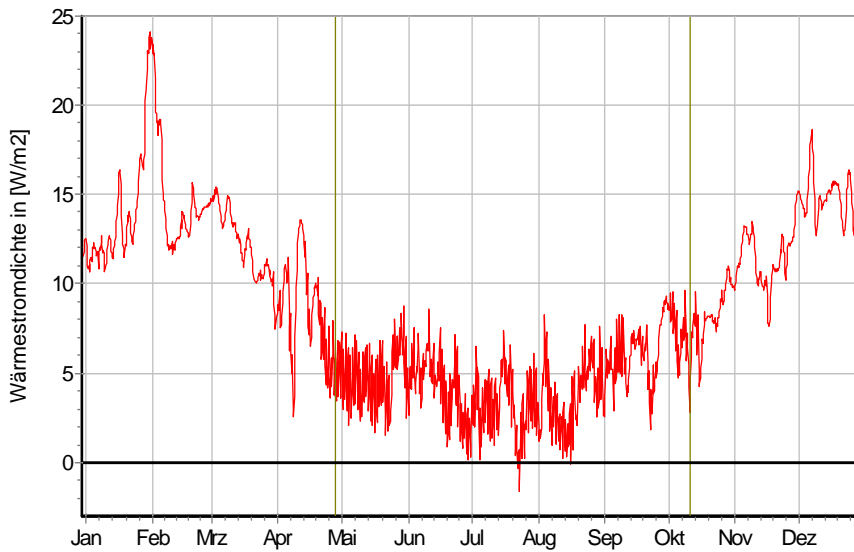
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	12,147	13,612	14,981
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	4,770*	5,944*	6,877*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



5.2 Instationäre Wärmeverluste

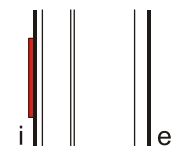
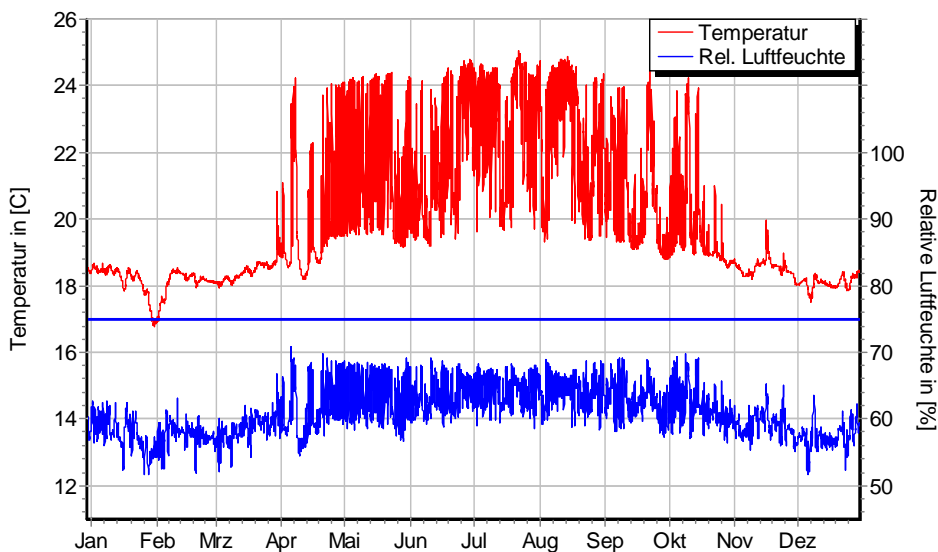


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

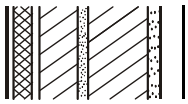
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	11,99	8,22	5,58
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,07	0,68	0,47	0,32
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,31	1,30	1,97	2,98

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	12,80	8,91	6,06
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2,05	0,73	0,51	0,34
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,32	1,20	1,80	2,73

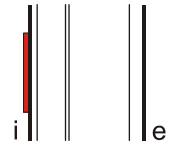
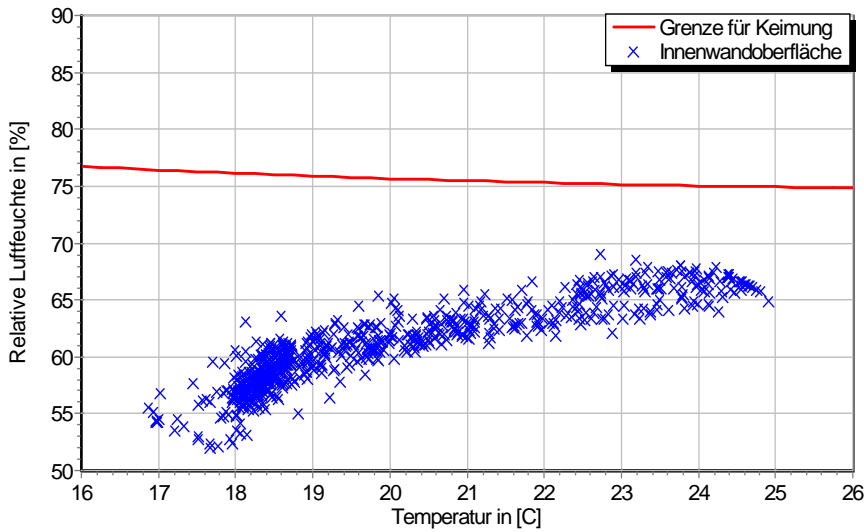
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



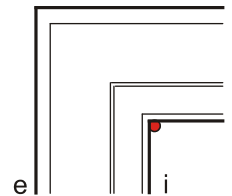
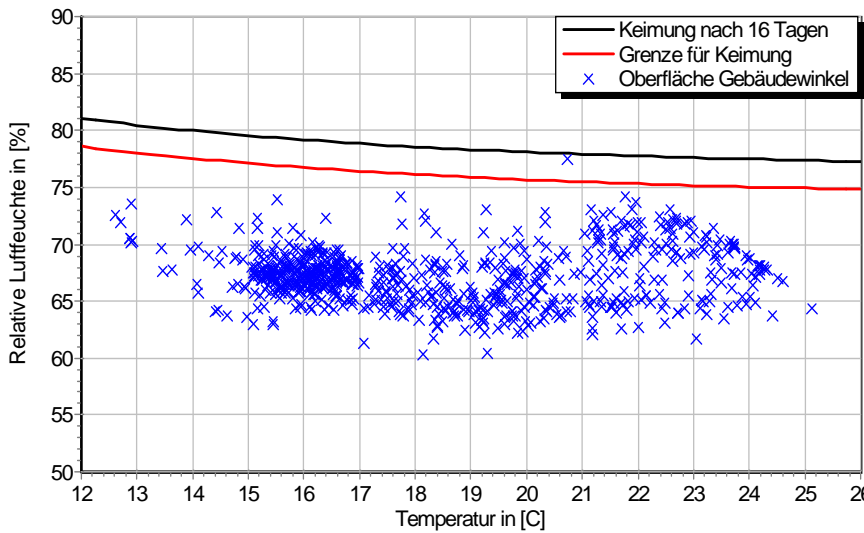
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

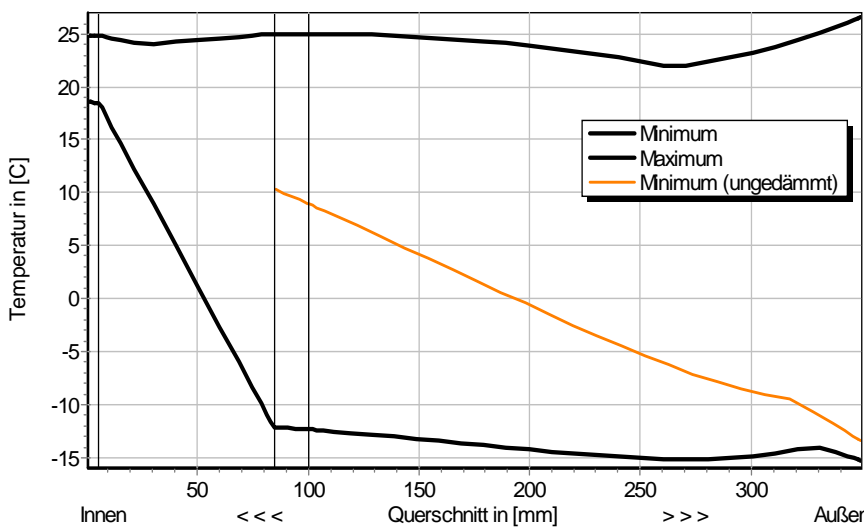


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



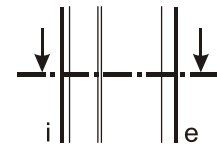
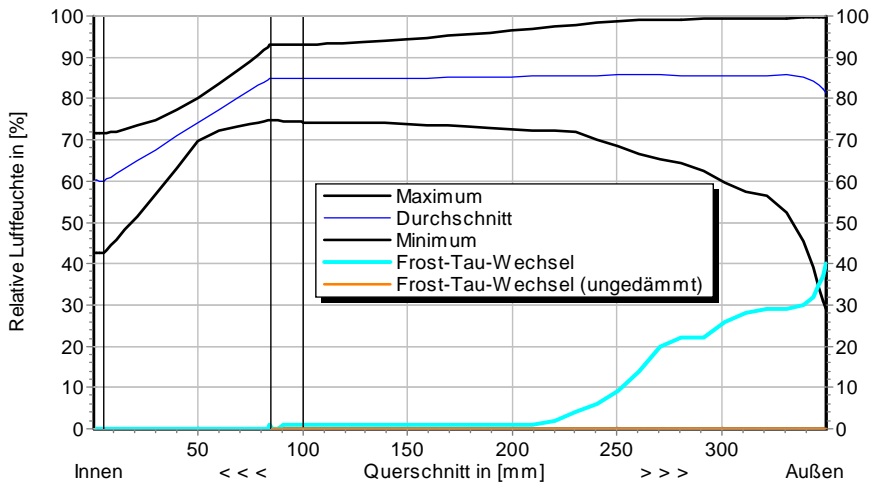
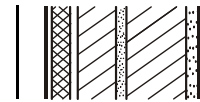
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

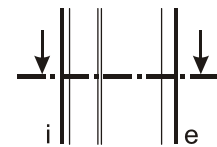
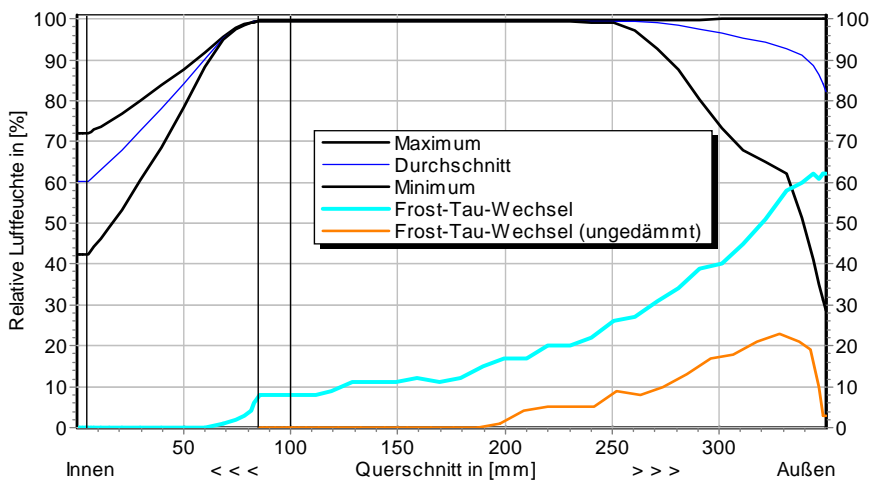


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



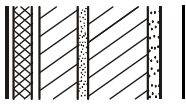
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	35	42	46
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	93,9	93,4	93,0
	WL_w	%	100	115,7	124,8	124,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,1	93,9	93,8
	CIL_φ	%	100	92,6	90,8	89,6
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	60	66	70
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,1	94,6	94,1
	WL_w	%	100	120,1	124,0	126,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	92,8	92,0	91,6
	CIL_φ	%	100	99,5	96,8	94,8



8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllen alle gedämmten Varianten die Kriterien.

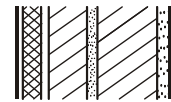
Bei hoher eindringender Schlagregenmenge wird in allen gedämmten Varianten der Grenzwert für Kondensat weit überschritten und die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Bei den gedämmten Konstruktionen ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

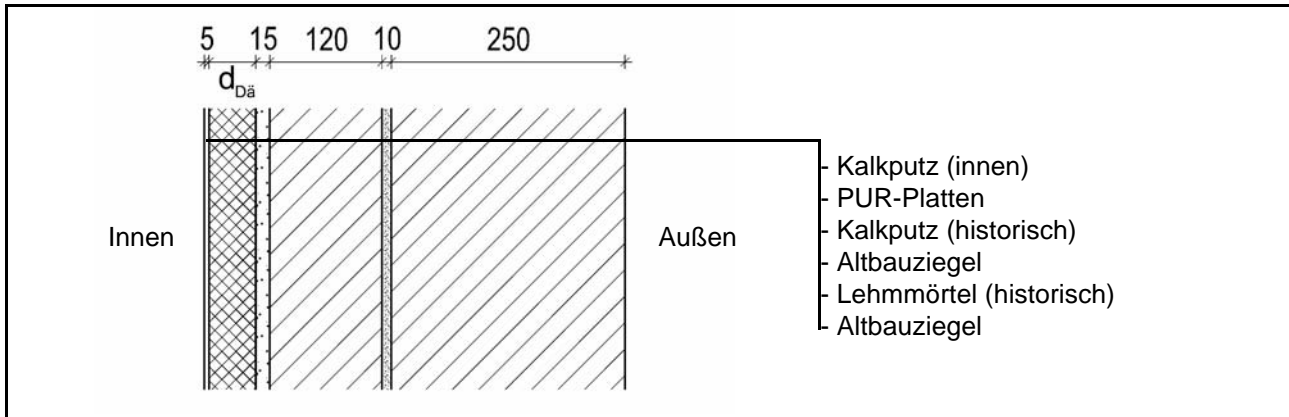
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwolleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1

8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

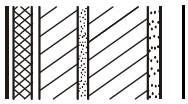
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,49	1,57	2,29	3,36
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,51	0,57	0,41	0,28
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,083	0,064	0,042
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,379	0,301	0,256
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,528	0,791	0,840	0,878

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,49	1,57	2,29	3,36
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,51	0,57	0,41	0,28
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,032	0,008	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,379	0,301	0,256
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	72,5	57,5	55,2	53,6
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,06	5,06	8,06
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	1,08	1,79	2,86
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	23,5	9,6



8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

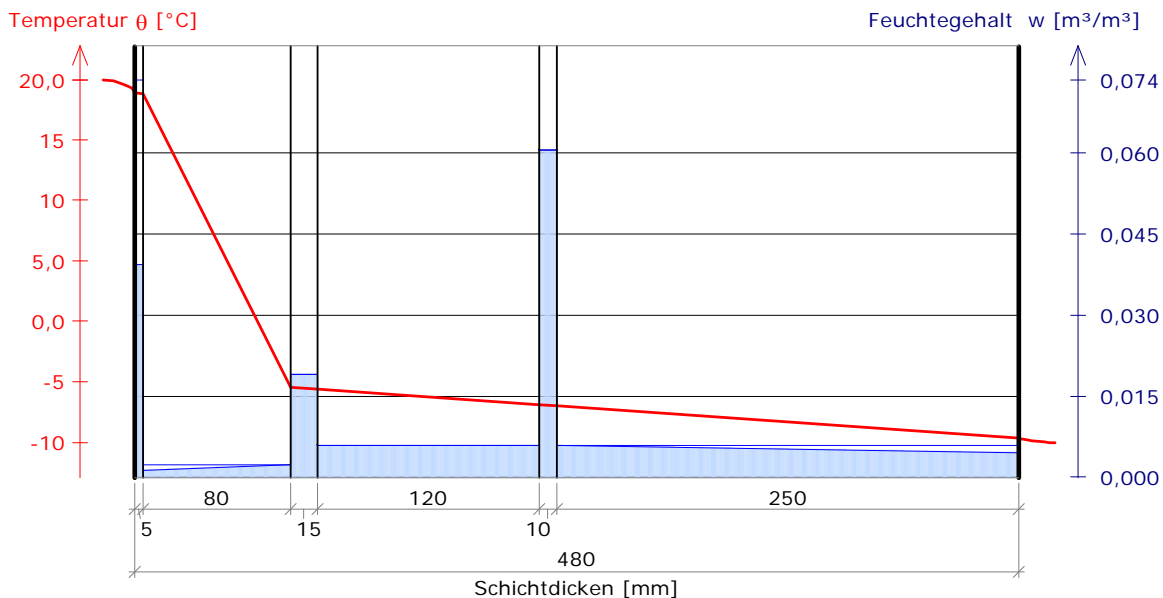
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

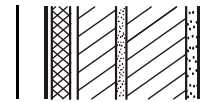
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

	Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
	Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1	Kalkputz (innen)	18,9	2183	1169	0,039		
					0,039		
2	Polyurethanplatten	18,8	2175	1164	0,001	0,0	0,00
3	Kalkputz (historisch)	-5,5	386	386	0,002	0,0	0,00
					0,019	15,0	0,00
4	Altbauziegel	-5,6	381	381	0,019		
					0,006	120,0	0,00
5	Lehmmörtel (hist.)	-6,9	342	342	0,006		
					0,061	10,0	0,00
6	Altbauziegel	-7,0	338	338	0,061	0,0	0,00
					0,006		
	Luftschicht (Außenseite)	-9,7	268	208	0,005		
		-10	260	208			



8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

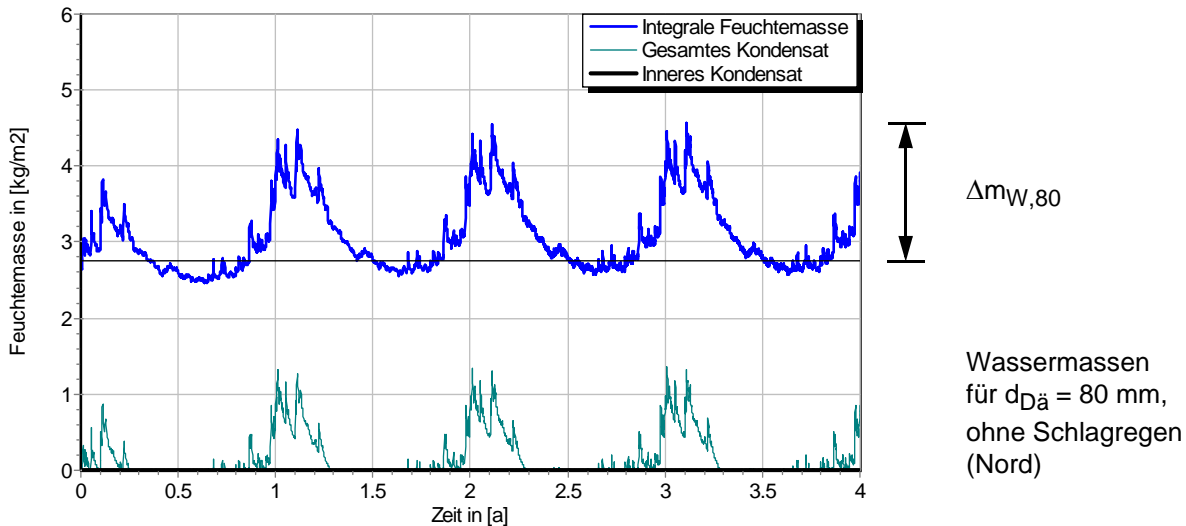


5 Simulationsergebnisse

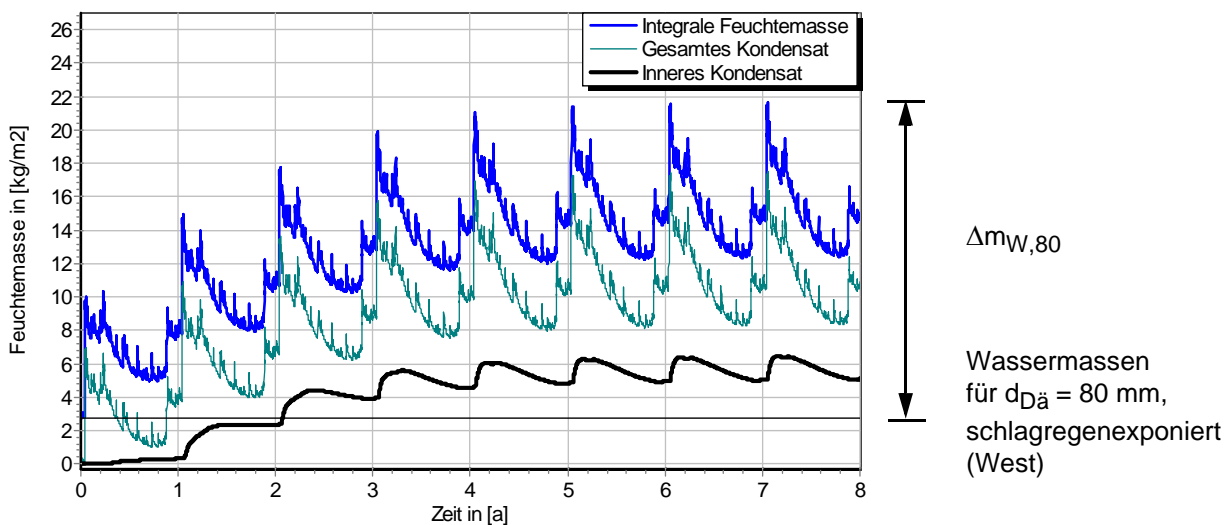
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



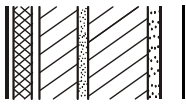
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,350	0,982	1,398	1,806
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

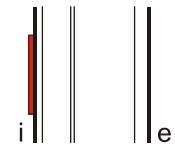
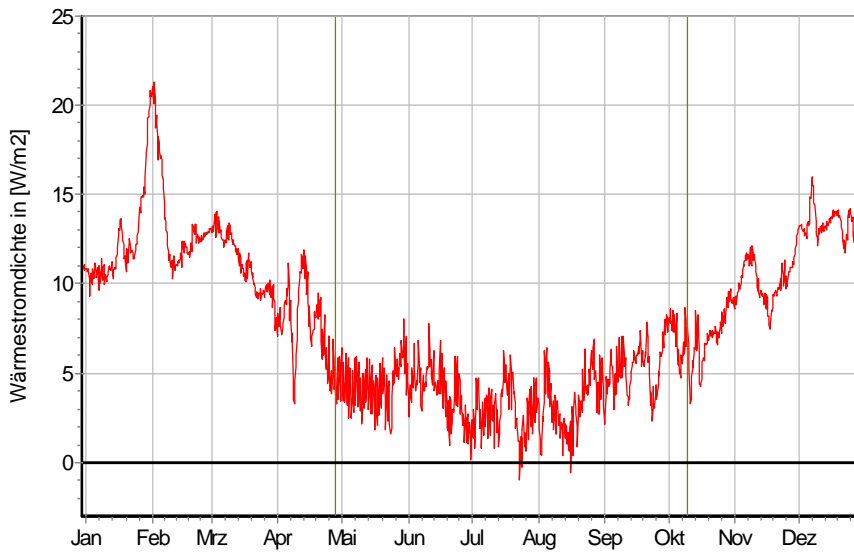


Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,927	15,482	17,427	18,893
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	4,666	5,715	6,415



8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

5.2 Instationäre Wärmeverluste

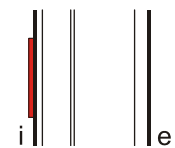
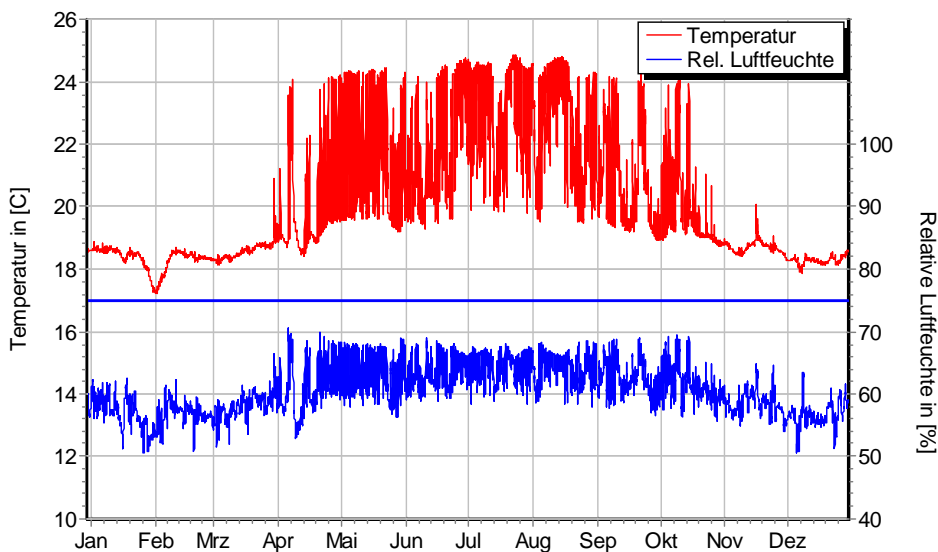


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,42	10,81	7,64	5,31
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,56	0,61	0,43	0,30
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,47	1,46	2,13	3,14

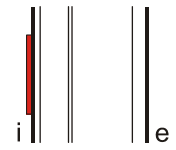
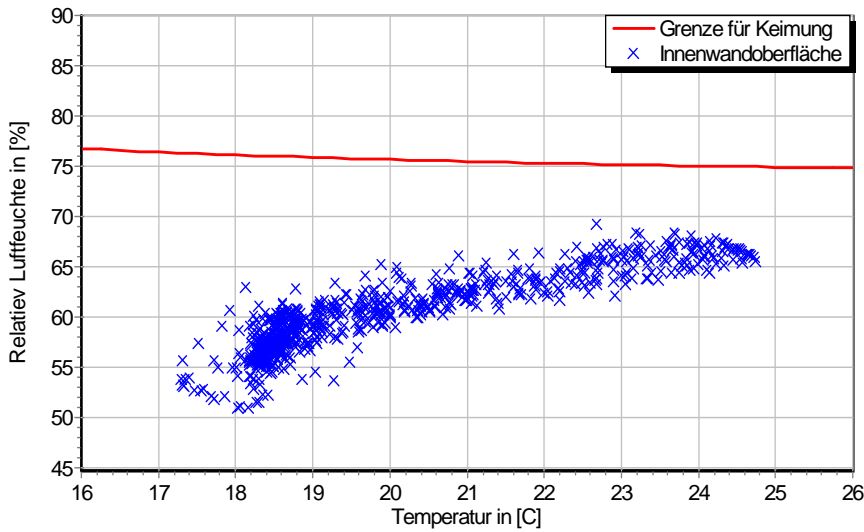
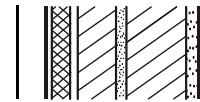
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,08	11,39	8,18	5,71
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,54	0,65	0,46	0,32
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	1,37	1,98	2,91

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

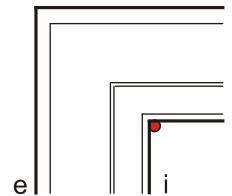
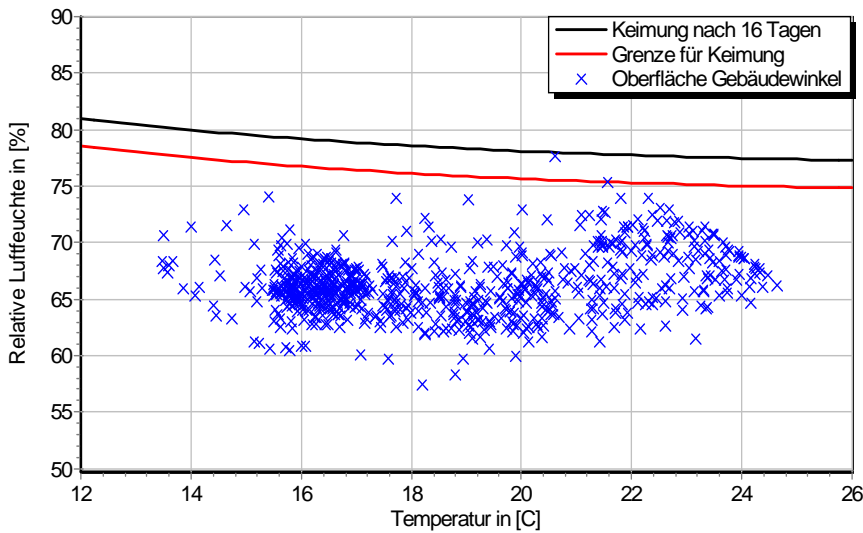


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

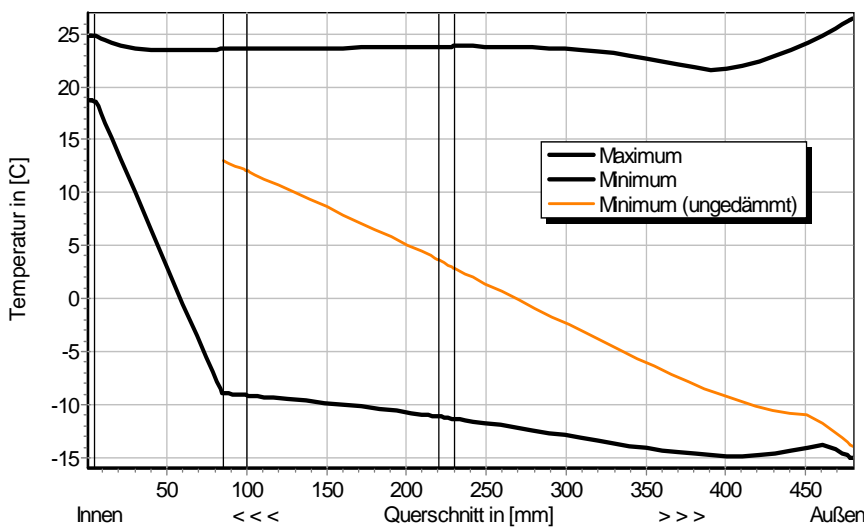


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

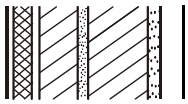


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

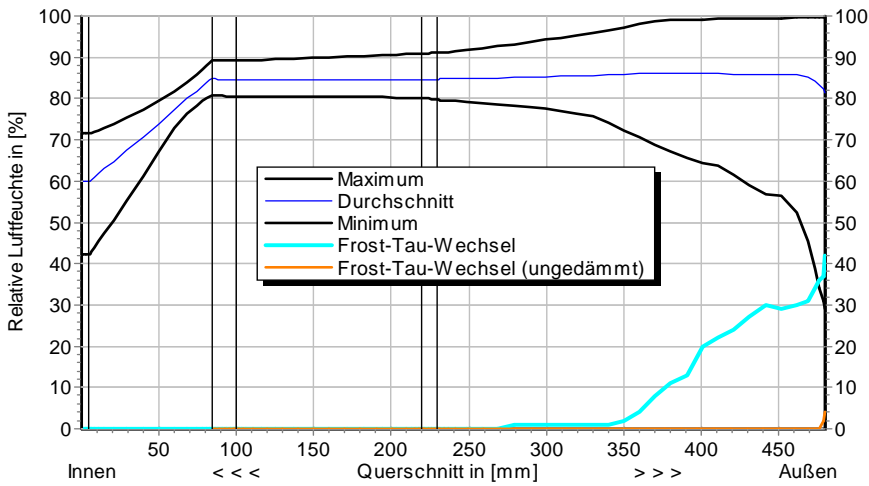
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



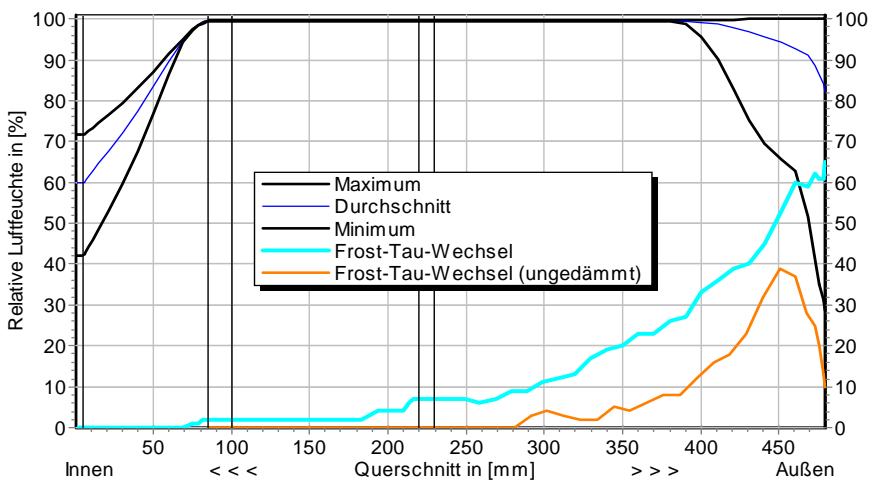
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)

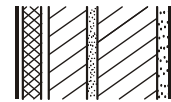


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	10	37	43	47
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,9	94,5	94,2
	WL_w	%	100	123,8	130,9	129,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,1	97,2	97,4
	CIL_φ	%	100	94,2	92,6	91,7
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	39	62	68	71
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,5	96,1	95,7
	WL_w	%	100	116,4	119,1	121,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	95,8	95,4	95,1
	CIL_φ	%	100	98,2	96,1	94,4

8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

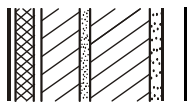
Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllen alle gedämmten Varianten die Kriterien.

Bei hoher eindringender Schlagregenmenge wird in allen gedämmten Varianten der Grenzwert für Kondensat weit überschritten und die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Bei den gedämmten Konstruktionen ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

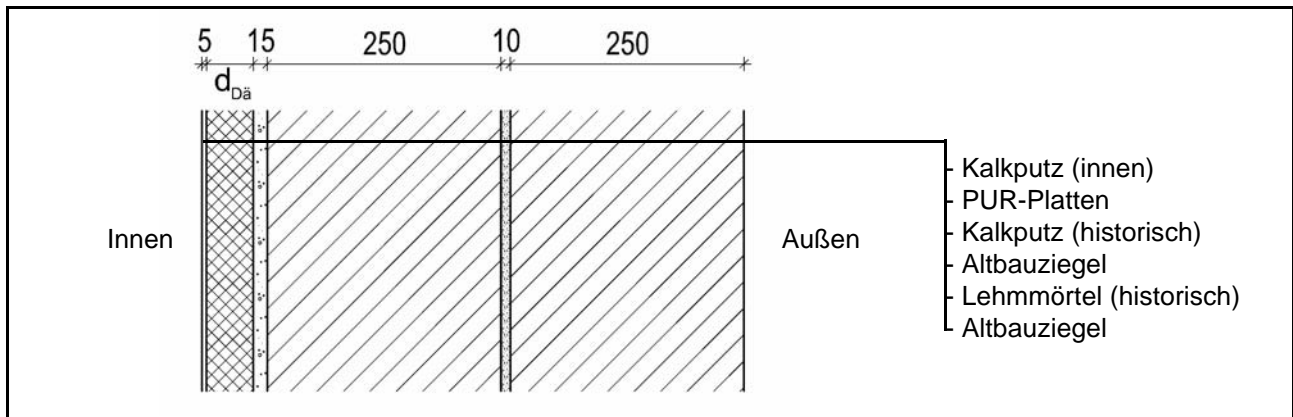
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwolleleichtbauplatte, außen unverputzt: 4.2
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.2



8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

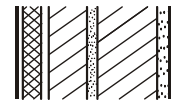
	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,66	1,74	2,45	3,52
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,21	0,52	0,38	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,064	0,057	0,042
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,335	0,257	0,212
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,583	0,803	0,847	0,882

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,66	1,73	2,45	3,52
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,21	0,53	0,38	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,335	0,257	0,212
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{Si}	%	66,7	56,8	54,9	53,4
Innendämmsystem: ** feuchteabhängig						
s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,06	5,06	8,06
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	1,08	1,79	2,86
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	23,5	9,6

8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



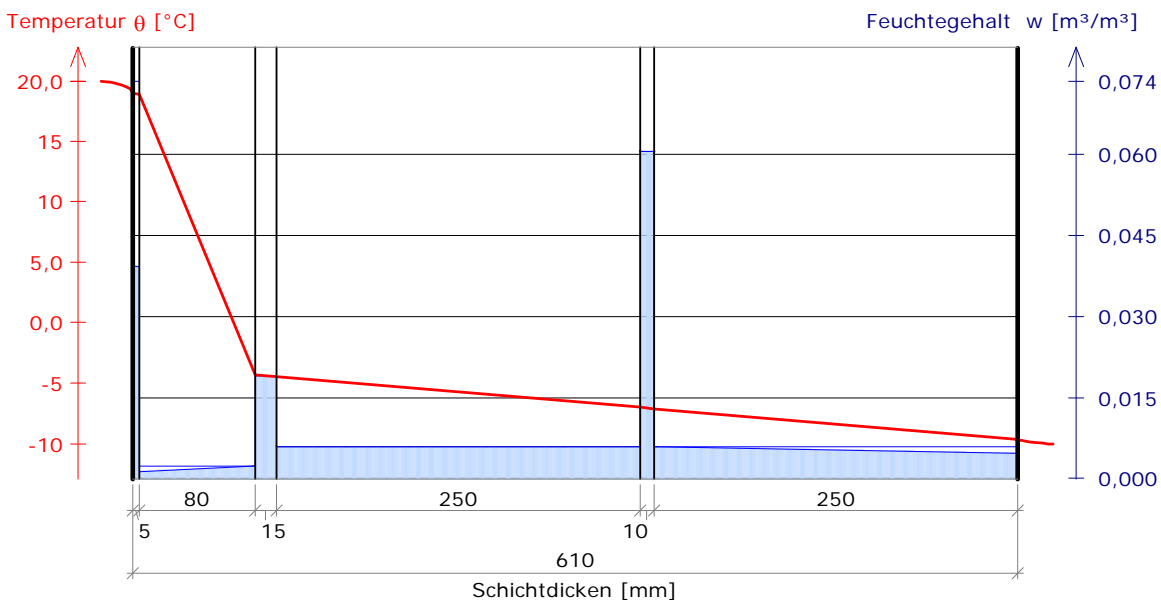
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

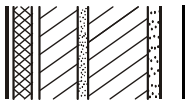
	Bedingung	Unsanier		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,9	2190	1169	0,039		
				0,039		
2 Polyurethanplatten	18,9	2182	1164	0,001		
				0,002	0,0	0,00
3 Kalkputz (historisch)	-4,3	425	425	0,019	15,0	0,00
				0,019		
4 Altbauziegel	-4,5	420	420	0,006	250,0	0,00
				0,006		
5 Lehmörtel (hist.)	-7,0	338	338	0,061	10,0	0,00
				0,061		
6 Altbauziegel	-7,1	334	334	0,006	0,0	0,00
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,7	267	208			
	-10	260	208			





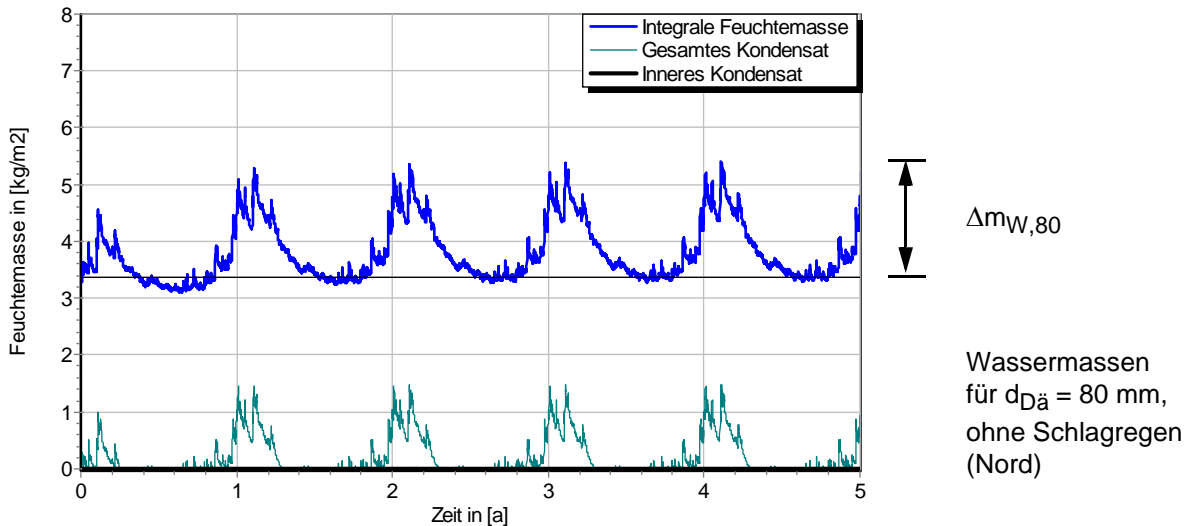
8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

5 Simulationsergebnisse

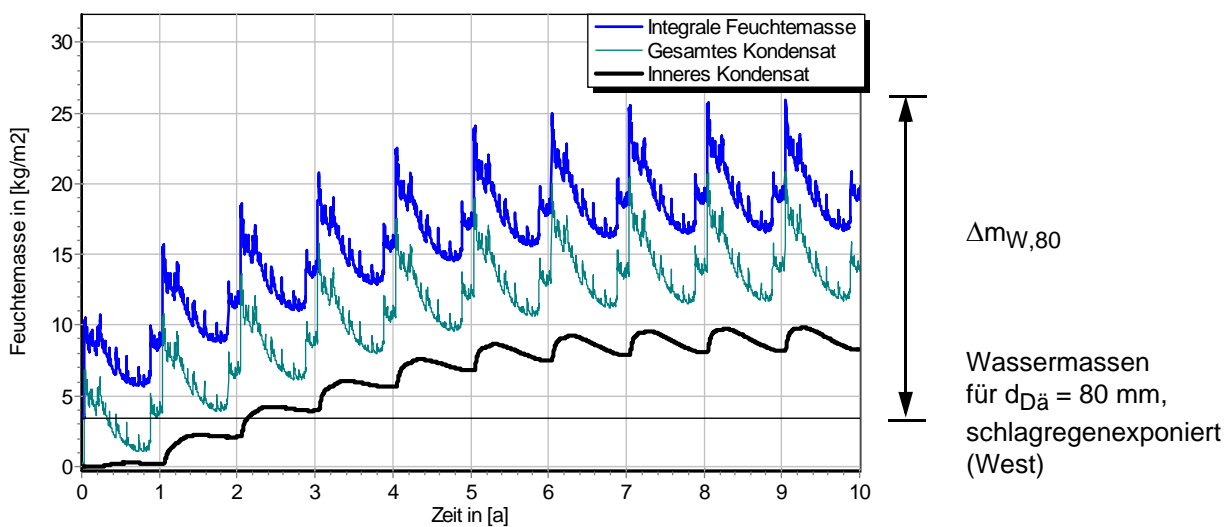
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen

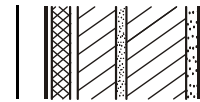


Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,434	1,136	1,573	2,017
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

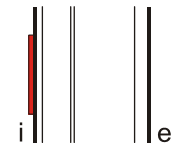
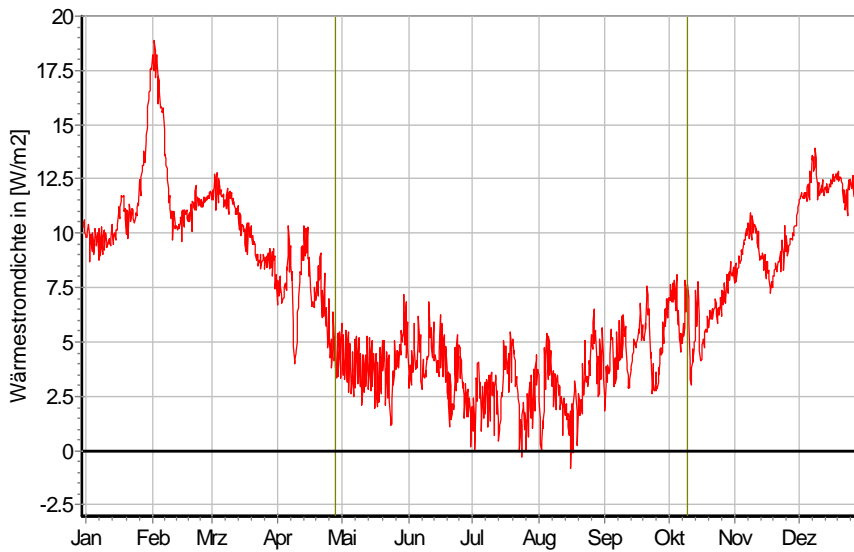


Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,446	18,009	20,792	22,676
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	6,752	8,697	9,956

8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



5.2 Instationäre Wärmeverluste

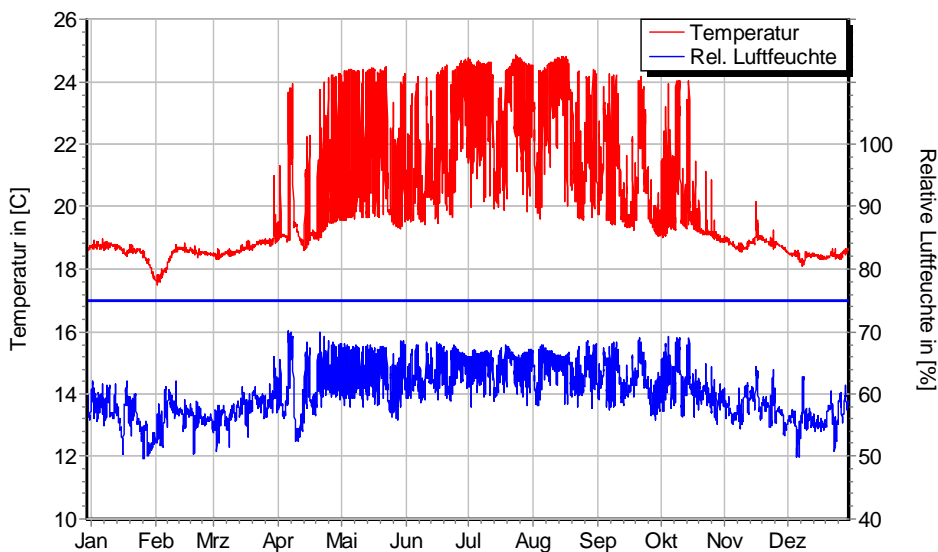


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

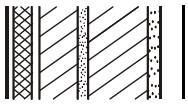
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	22,02	9,86	7,16	5,07
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,25	0,56	0,41	0,29
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,63	1,61	2,29	3,30

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,73	10,28	7,58	5,45
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,24	0,58	0,43	0,31
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,64	1,54	2,15	3,06

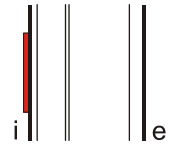
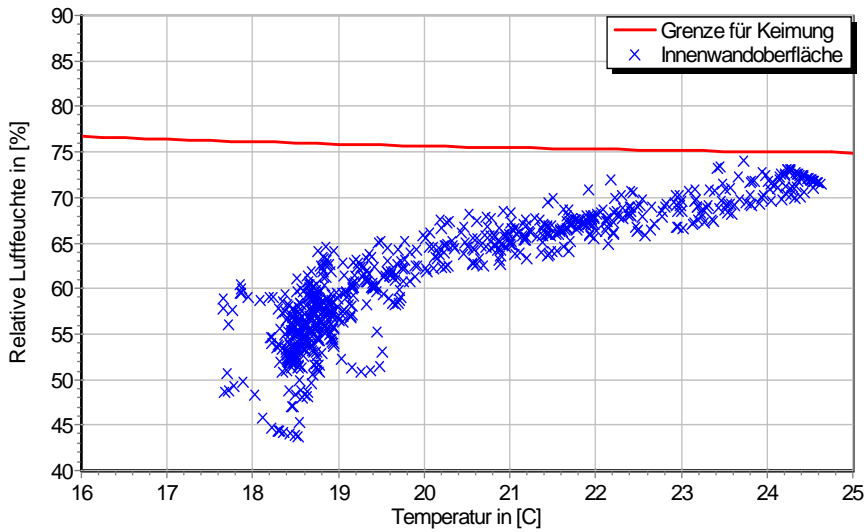
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



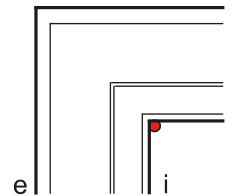
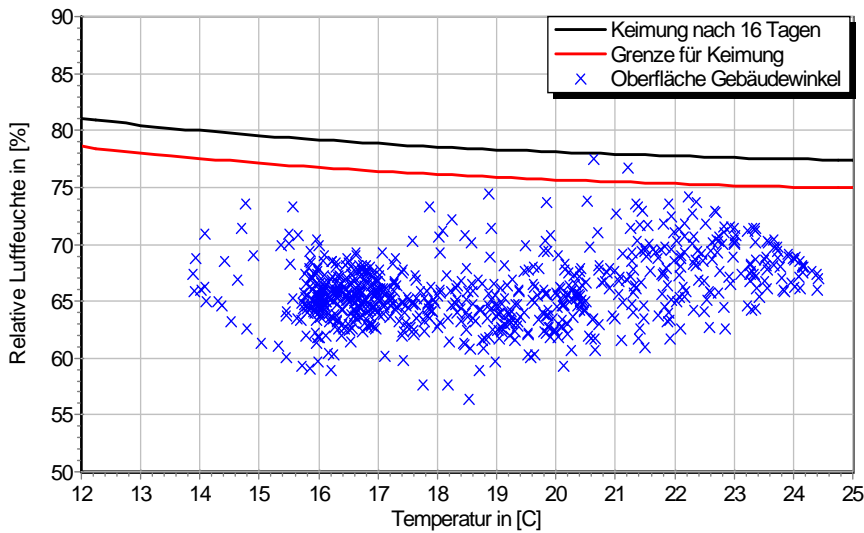
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

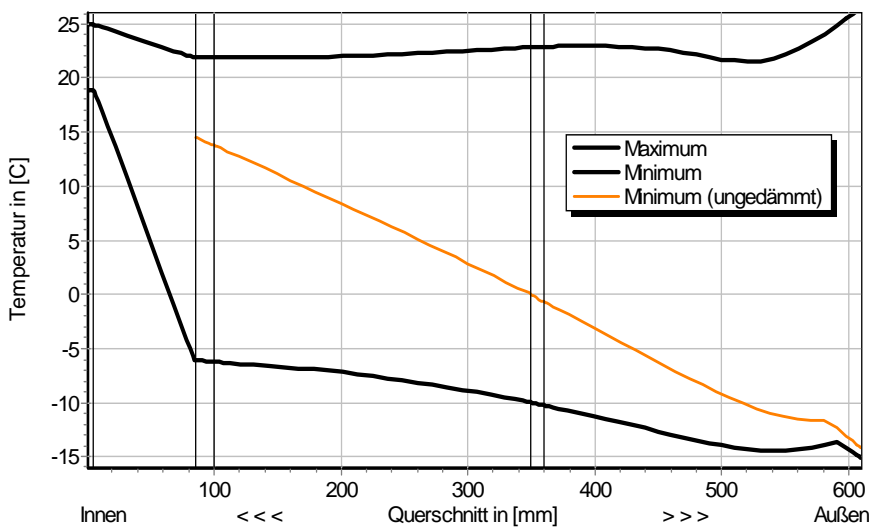


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



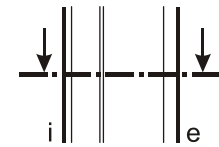
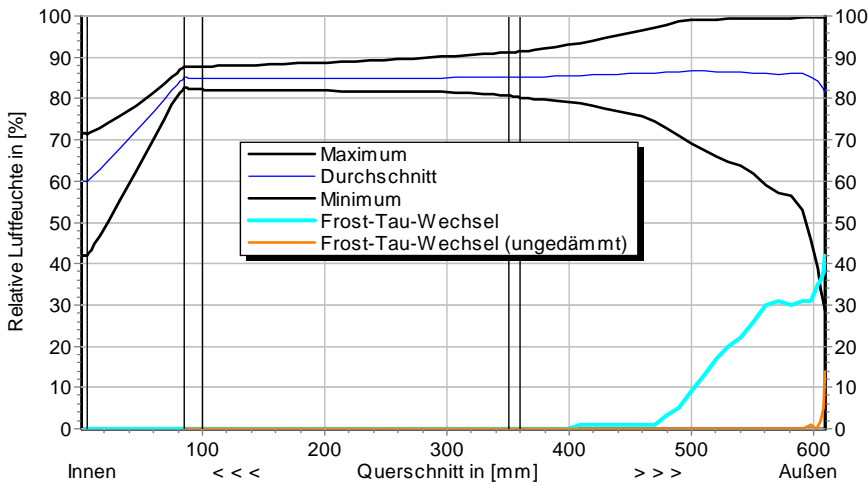
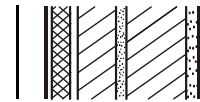
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

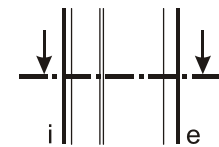
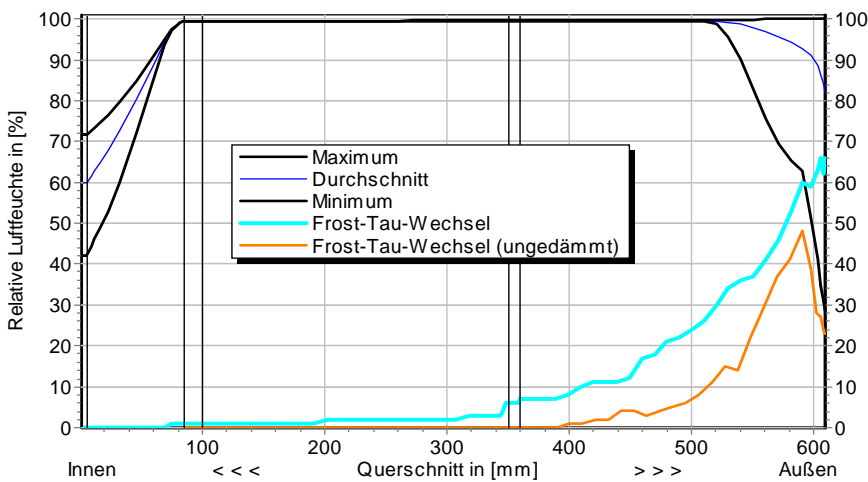


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt



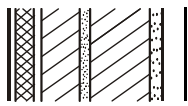
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	39	44	47
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	95,8	95,5	95,2
	WL_w	%	100	120,6	124,4	122,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,5	97,9	97,8
	CIL_{φ}	%	100	94,7	93,3	92,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	64	69	71
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,2	96,9	96,6
	WL_w	%	100	111,4	112,9	114,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,3	97,2	97,0
	CIL_{φ}	%	100	97,5	95,5	94,0



8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)		Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz		$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)		Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllen alle gedämmten Varianten die Kriterien.

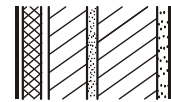
Bei hoher eindringender Schlagregenmenge wird in allen gedämmten Varianten der Grenzwert für Kondensat weit überschritten und die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Bei den gedämmten Konstruktionen ist im Gebäudewinkel kein Schimmelpilzwachstum festzustellen.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

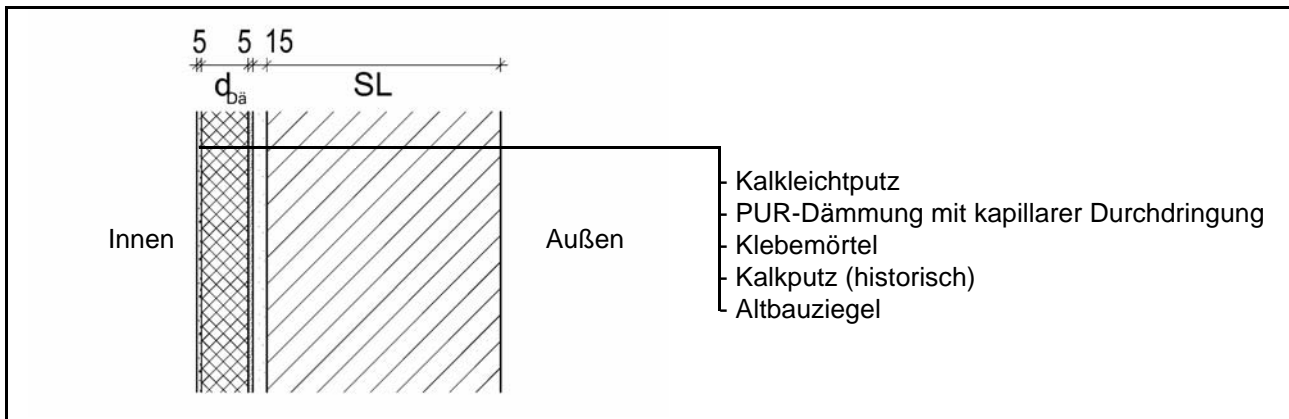
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.3

8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30\text{mm}/1\text{ SL}, 50\text{mm}/1\frac{1}{2}\text{ SL}, 80\text{mm}/2\text{ SL}$

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkleichtputz	470	0,169	8,4	6,0	72,6	0,013
PUR-Dämmung mit kapillarer Durchdringung	50	0,037	27	0,1	94,0	0,013
Klebemörtel	1500	0,94	30	7,5	24,8	0,011
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

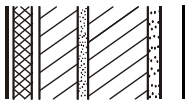
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,18	1,88	2,85
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,74	0,49	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,584	0,368	0,247
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,964	0,609	0,408
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,706	0,776	0,828

* mit $R_{Si} = 0,25\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,17	1,88	2,85
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,75	0,49	0,33
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,499	0,294	0,161
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,964	0,609	0,408
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	60,0	56,3	54,2
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,00	1,54	2,35
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,85	1,39	2,20
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	27,0	19,9	8,6



8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt

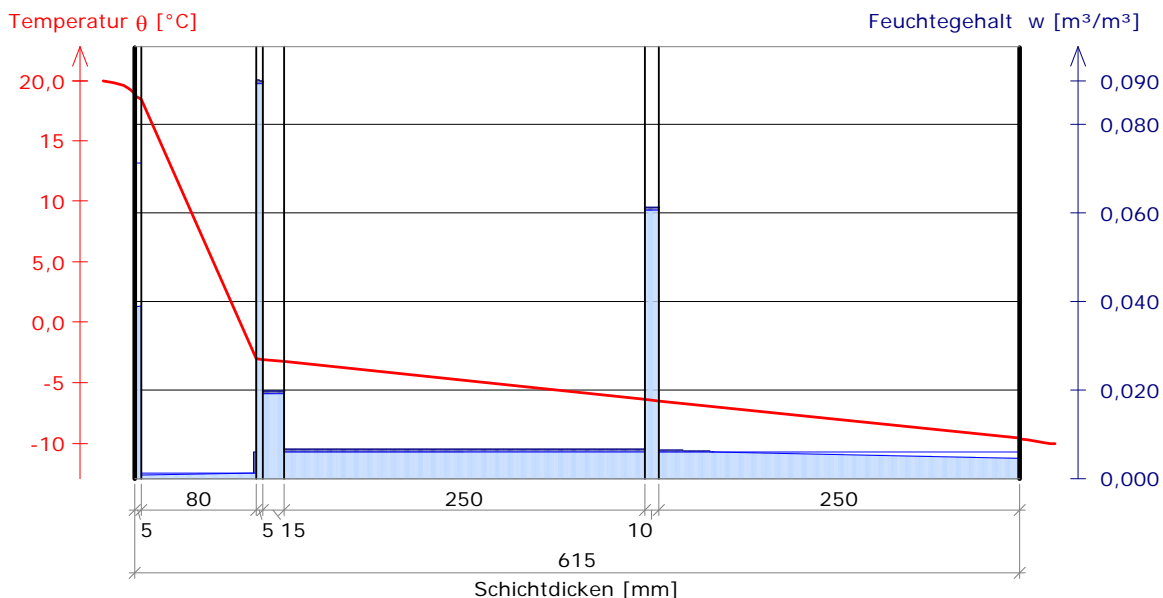
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanieret, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

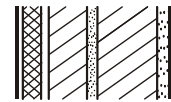
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ mit 2 Steinlängen

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,7	2158	1169	0,039		
				0,039		
2 PUR mit kap. Durchdringung	18,4	2119	1156	0,001		
				0,006	0,2	0,00
3 Klebemörtel	-3,0	474	474	0,090	5,0	0,00
				0,089		
4 Kalkputz (historisch)	-3,1	472	472	0,020	15,0	0,01
				0,020		
5 Altbauziegel	-3,3	465	465	0,007	250,0	0,13
				0,006		
6 Lehmörtel (hist.)	-6,4	357	357	0,061	10,0	0,00
				0,061		
7 Altbauziegel	-6,5	353	353	0,006	37,5	0,01
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,6	269	208			
	-10	260	208			



8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt

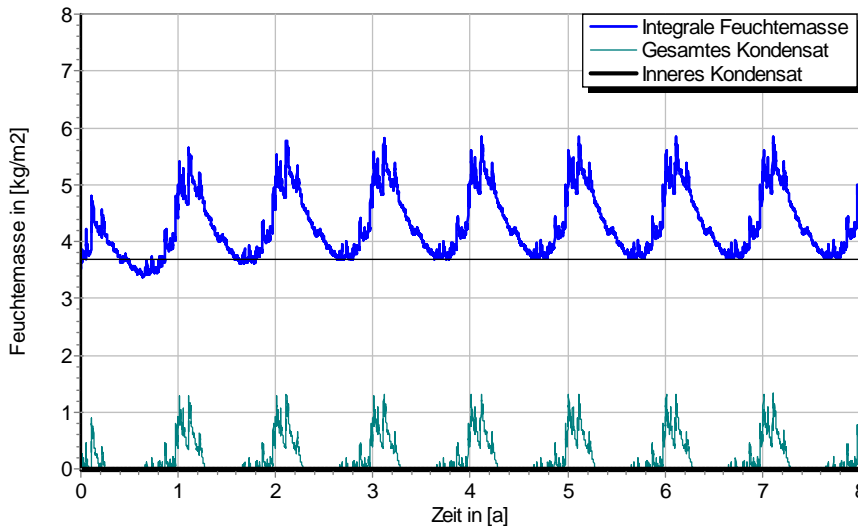


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau

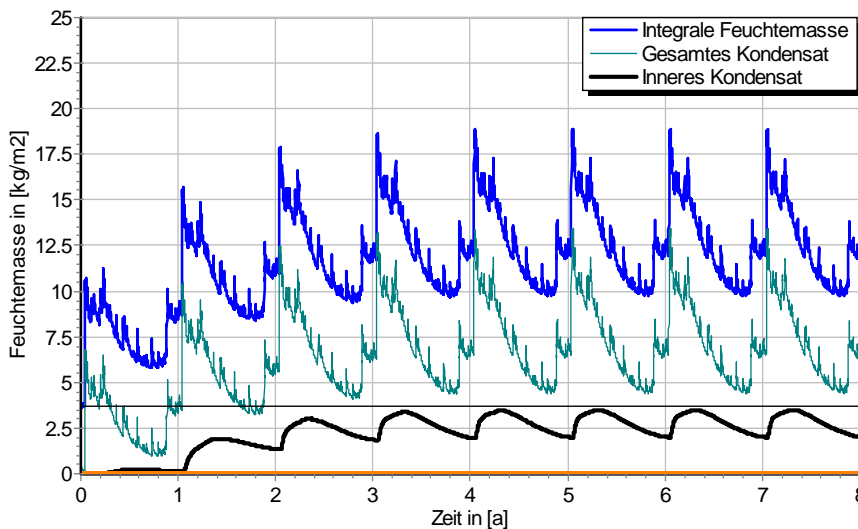


5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen

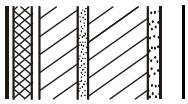
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	1,164	1,624	2,167
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,011	0,0	0,0



Wassermassen für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante (2 SL) in orange

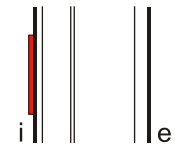
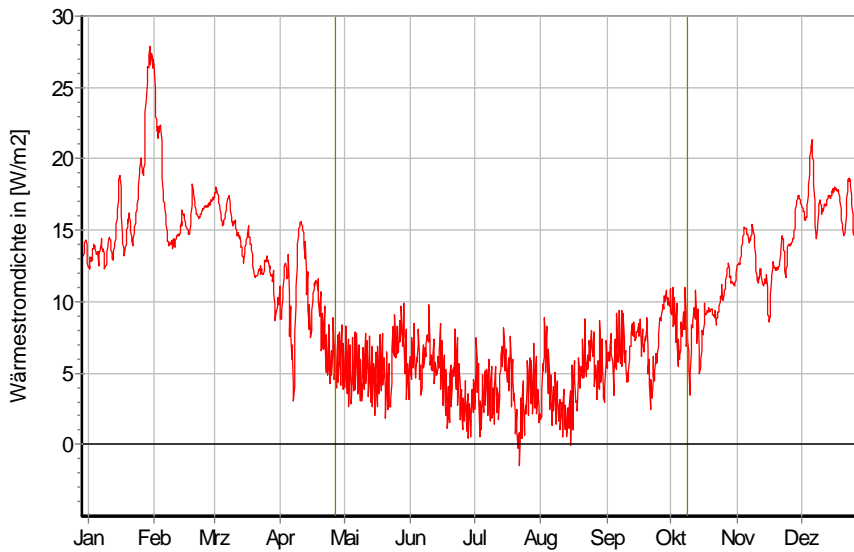
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	8,761	11,694	15,221
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	1,769*	1,221*	3,505*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt

5.2 Instationäre Wärmeverluste

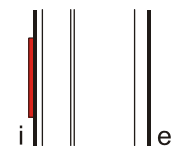
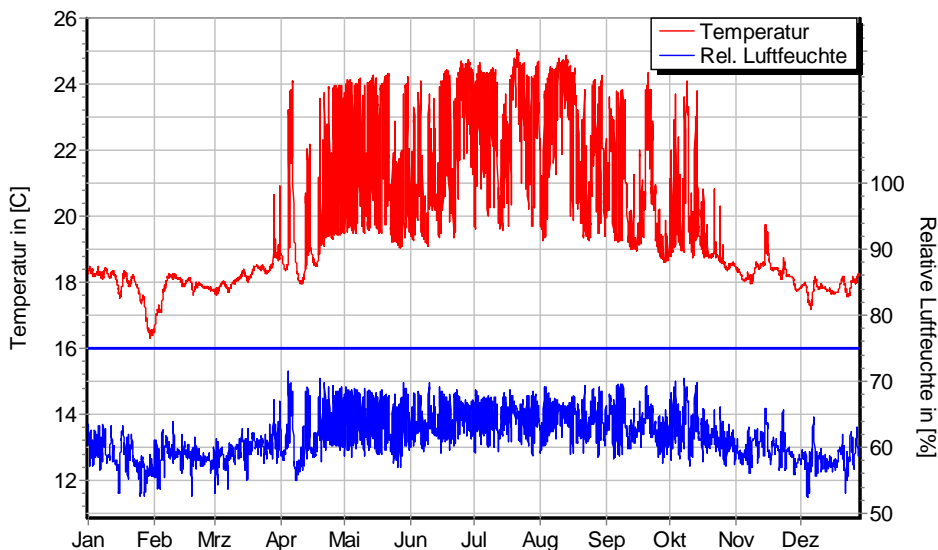


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	13,81	8,95	6,06
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,53	0,79	0,51	0,34
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,48	1,10	1,79	2,73

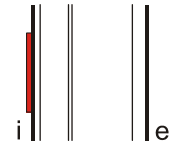
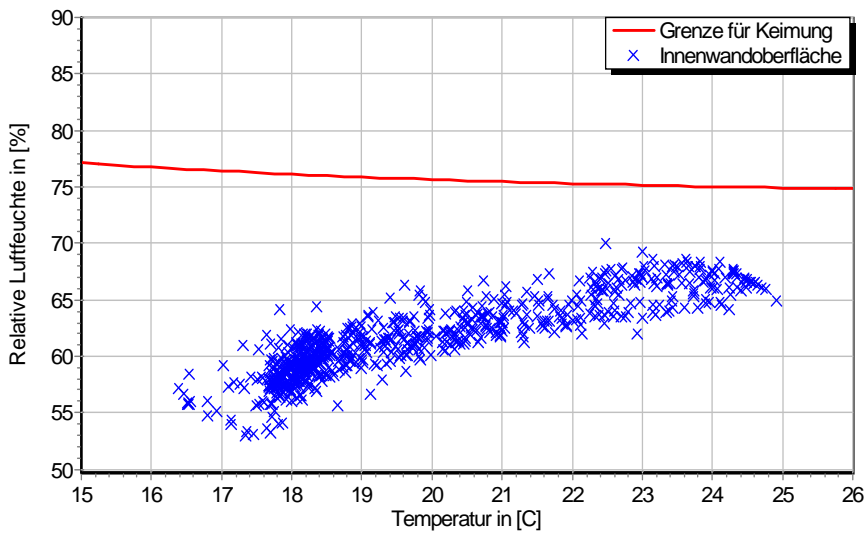
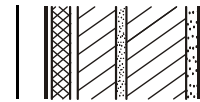
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	13,90	9,12	6,24
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,52	0,79	0,52	0,35
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	1,10	1,76	2,65

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

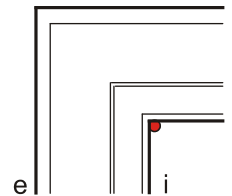
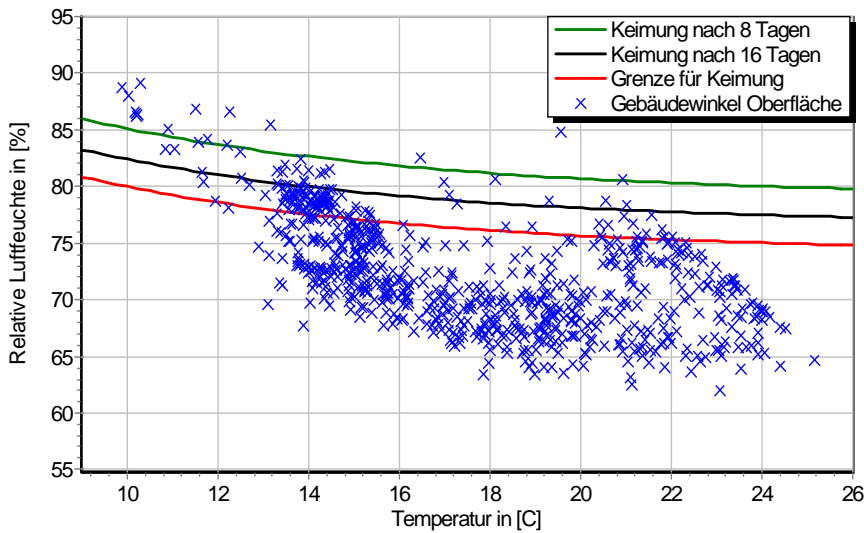


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt

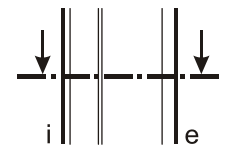
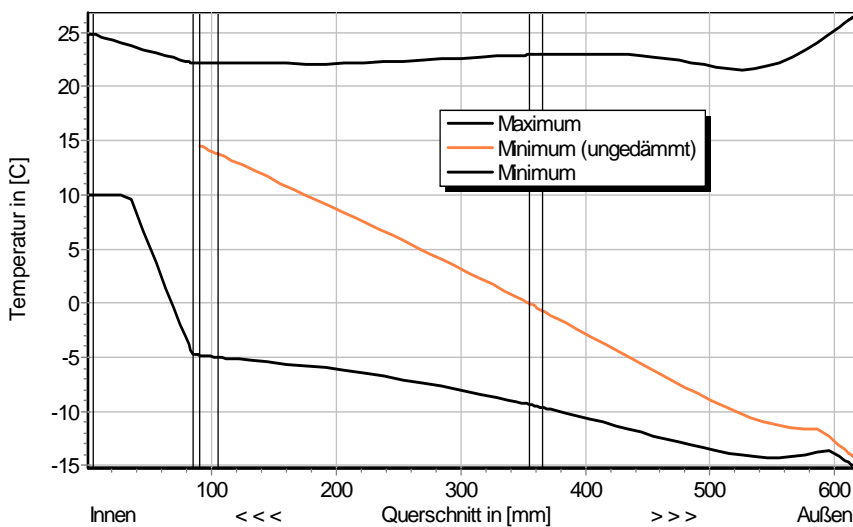


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

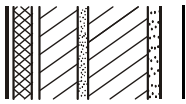


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

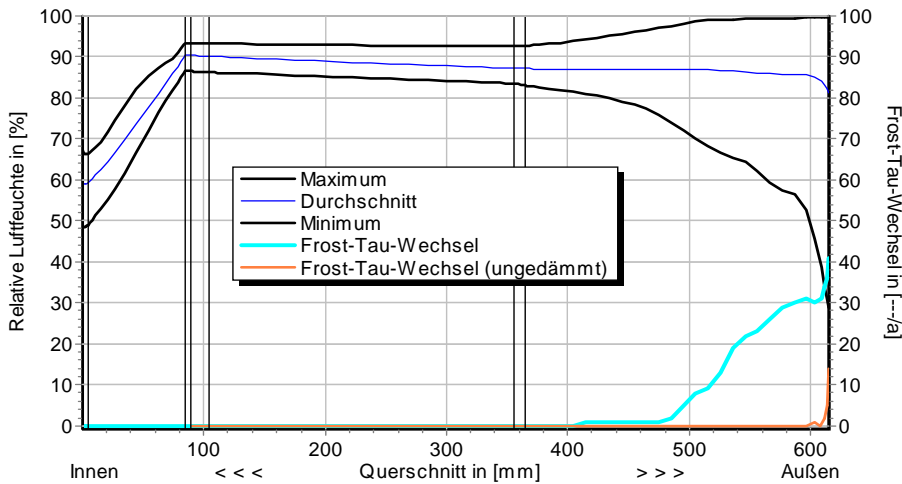
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



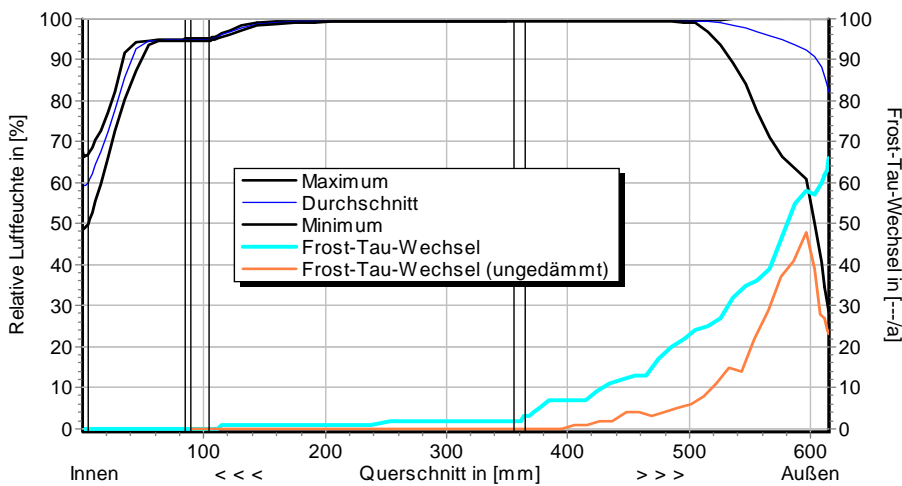
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

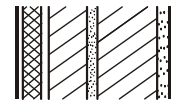


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	31	40	46
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	94,3	94,7	95,3
	WL_w	%	100	111,7	127,9	122,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	94,3	97,2	97,8
	CIL_{φ}	%	100	93,9	93,6	92,8
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	57	65	70
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	95,3	96,3	96,7
	WL_w	%	100	119,1	118,7	114,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	93,0	95,4	97,0
	CIL_{φ}	%	100	98,9	96,7	94,8

8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Der Mindestwärmeschutz wird ab 50 mm Dämmung (1½ SL) eingehalten. Es entsteht kein Kondensat.

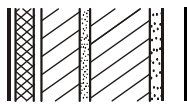
COND: Der Mindestwärmeschutz wird ab 50 mm Dämmung eingehalten. Es entsteht kein Kondensat.

Simulation: Ab 50 mm Dämmung ist der Mindestwärmeschutz gegeben. Ohne Schlagregen bildet sich kein inneres Kondensat. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen sehr hohe Kondensatmengen, die während der Trocknungsperiode nicht verdunsten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist ab 50 mm Dämmung nicht zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm (2 SL) Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

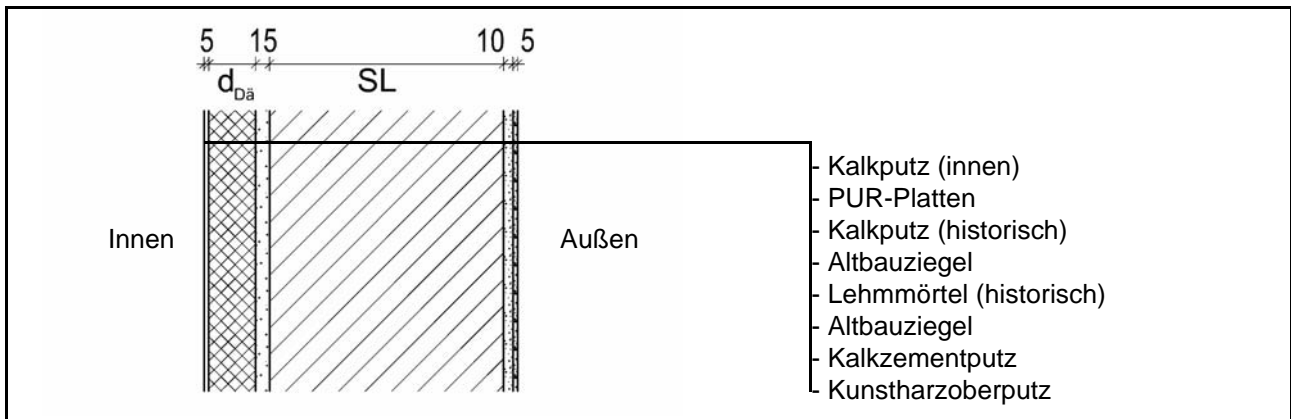
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3



8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä}$ = 30mm/1 SL, 50mm/1½ SL, 80mm/2 SL

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033
Kunstharzoberputz	1100	0,70	350	1,0	11,1	0,002

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

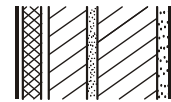
	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	1,43	2,31	3,54
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,63	0,40	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,174	0,099	0,057
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,518	0,439	0,224
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,46	0,780	0,841	0,882

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	1,43	2,30	3,54
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,63	0,40	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,124	0,022	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,518	0,439	0,224
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	58,2	55,1	53,4
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,06	5,06	8,06
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	1,08	1,79	2,86
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	23,5	9,6

8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz



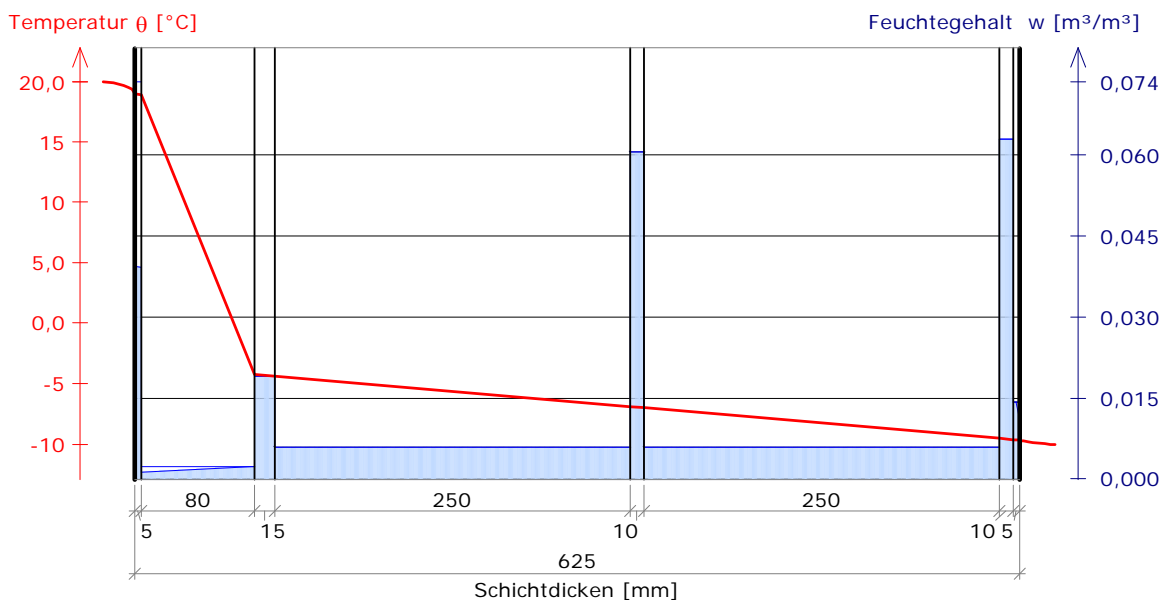
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

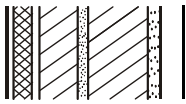
	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$ und 2 Steinlängen (SL)

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,9	2190	1169	0,039		
				0,039		
2 Polyurethan-(PUR-)Platten	18,9	2183	1164	0,001		
3 Kalkputz (historisch)	-4,2	429	429	0,002	0,0	0,00
				0,019	15,0	0,00
4 Altbauziegel	-4,4	424	424	0,006		
5 Lehmmörtel (historisch)	-6,9	341	341	0,006	250,0	0,00
				0,061	10,0	0,00
6 Altbauziegel	-7,0	338	338	0,006		
7 Kalkzementputz	-9,5	271	271	0,006	250,0	0,00
				0,063	10,0	0,00
8 Kunstharzoberputz	-9,6	269	269	0,063		
Luftschicht (Kaltseite)	-9,7	267	208	0,014	0,0	0,00
	-10	260	208	0,011		





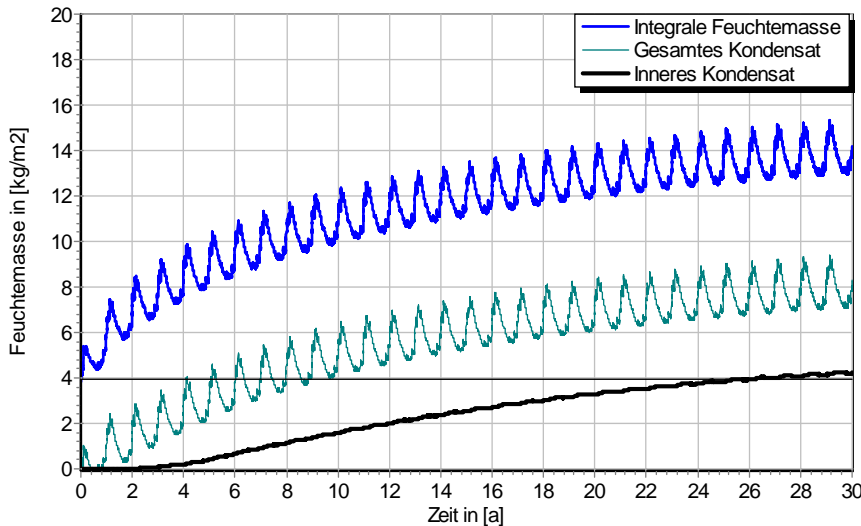
8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



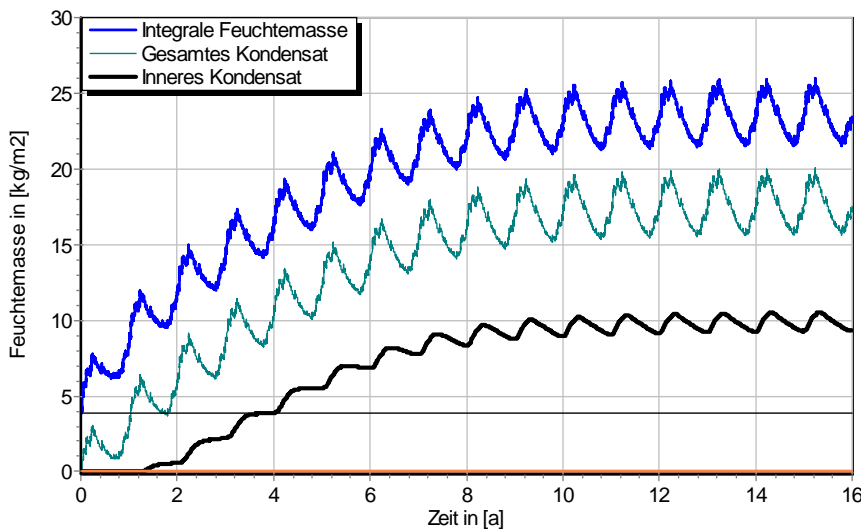
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	1,786	4,601	11,392
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,325	4,245



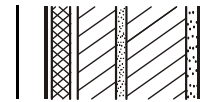
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der un-sanier-ten
 Variante (2 SL) in orange

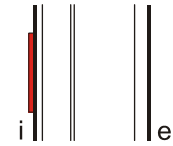
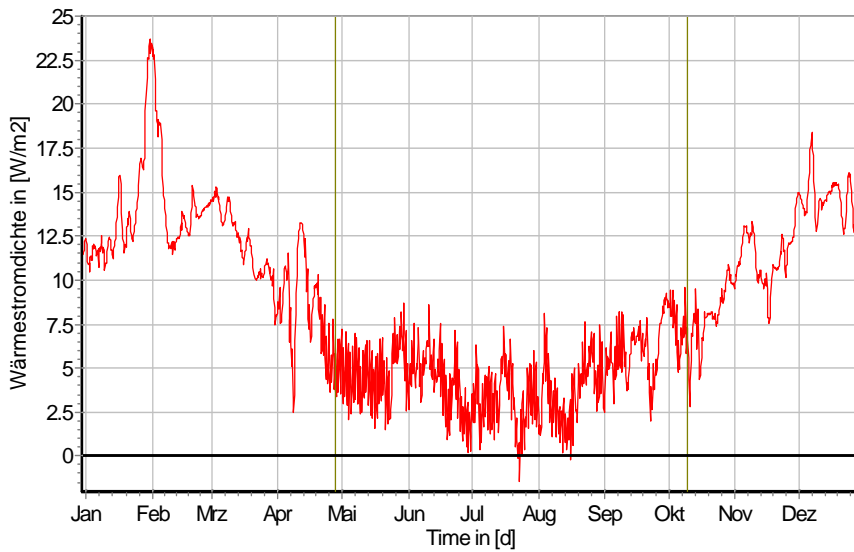
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	9,131	15,896	22,047
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	4,124*	5,665*	10,537*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz



5.2 Instationäre Wärmeverluste

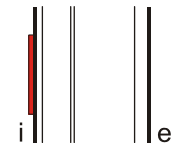
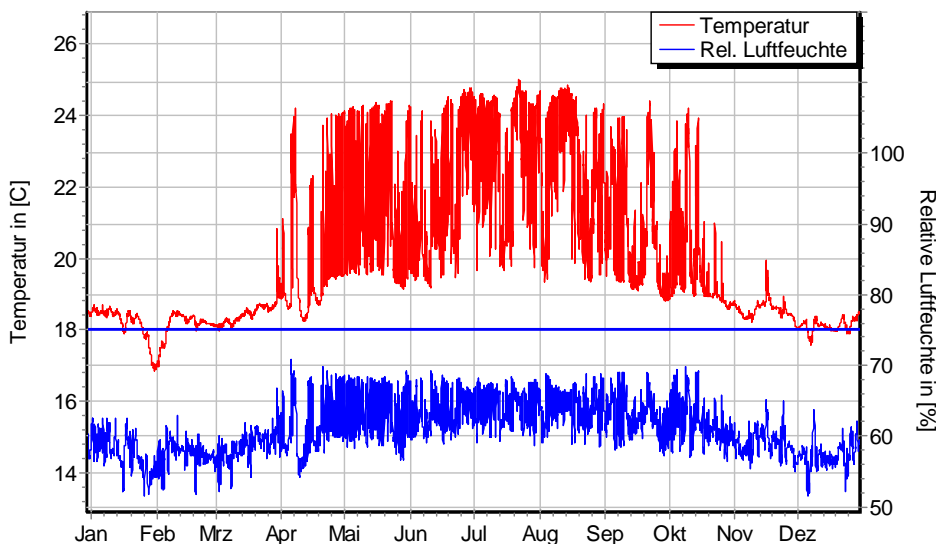


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

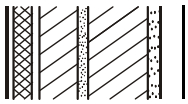
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	11,86	7,69	5,46
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,48	0,67	0,44	0,31
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,50	1,31	2,12	3,05

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	12,60	8,11	5,43
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,47	0,72	0,46	0,31
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,51	1,23	2,090	3,07

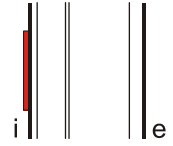
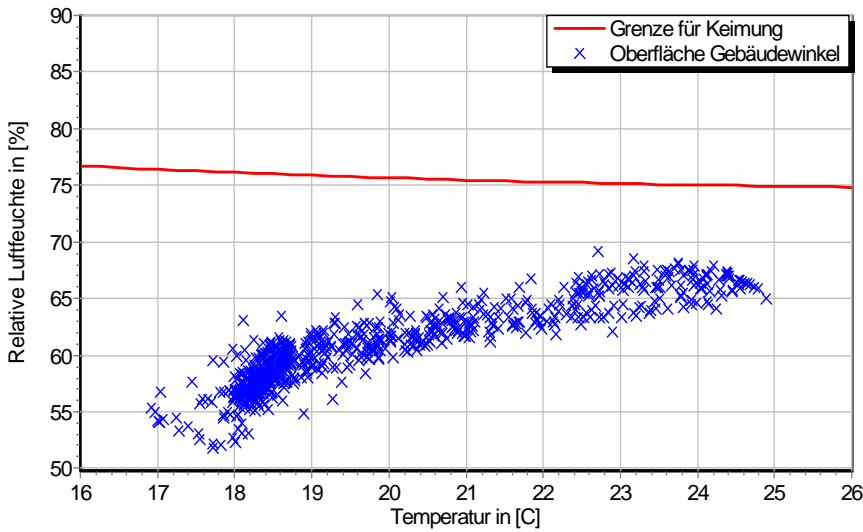
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



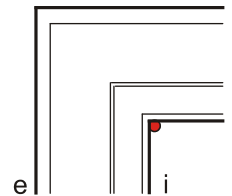
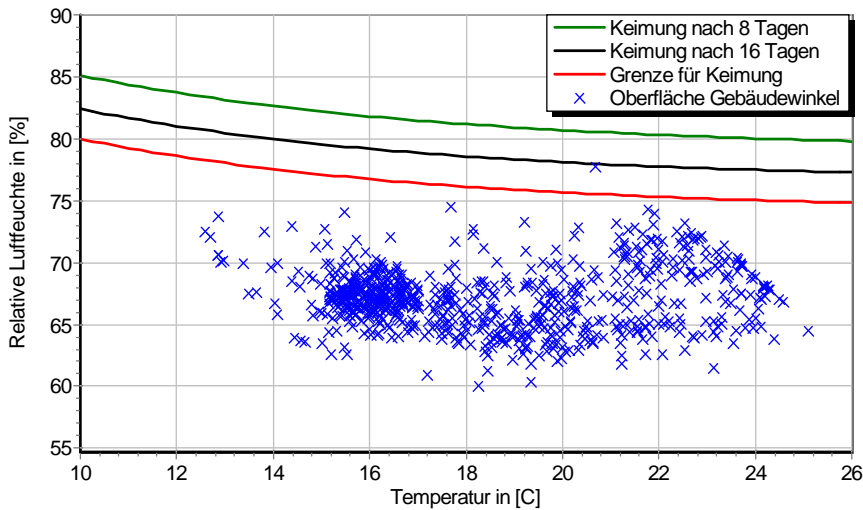
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz

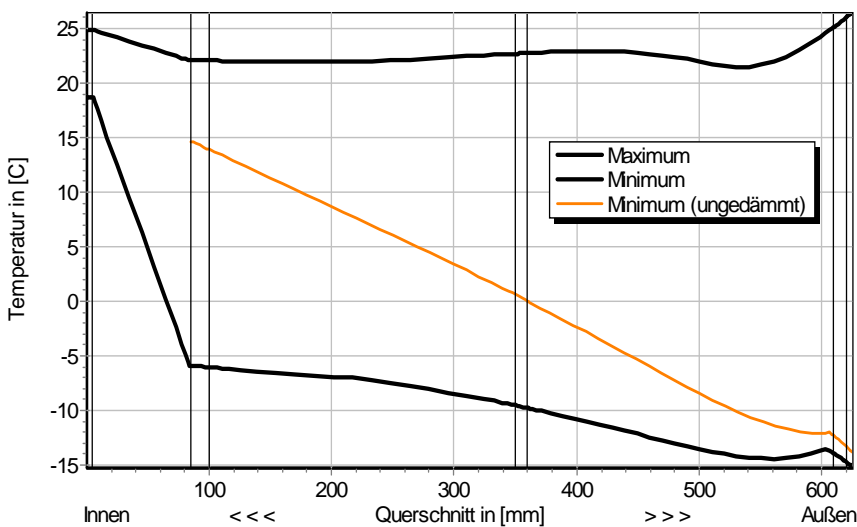


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



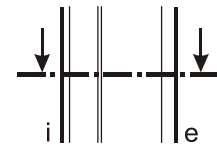
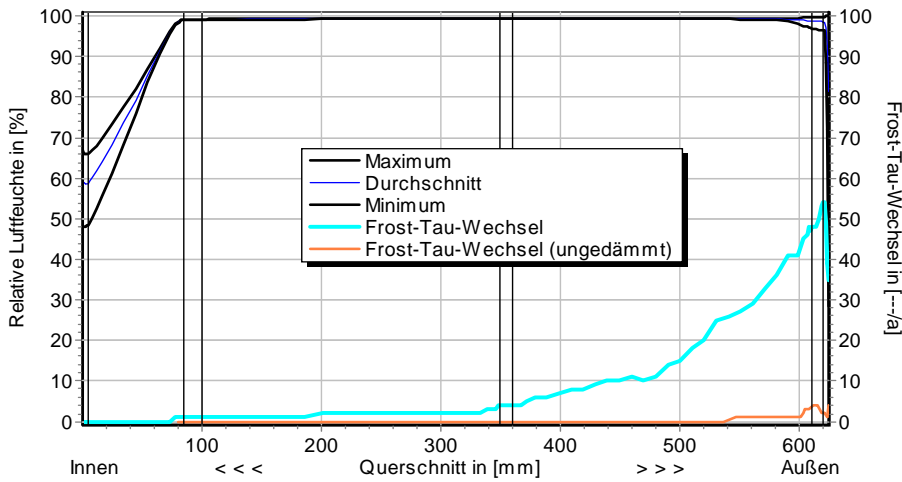
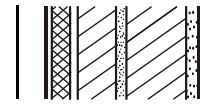
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

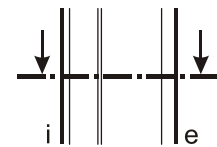
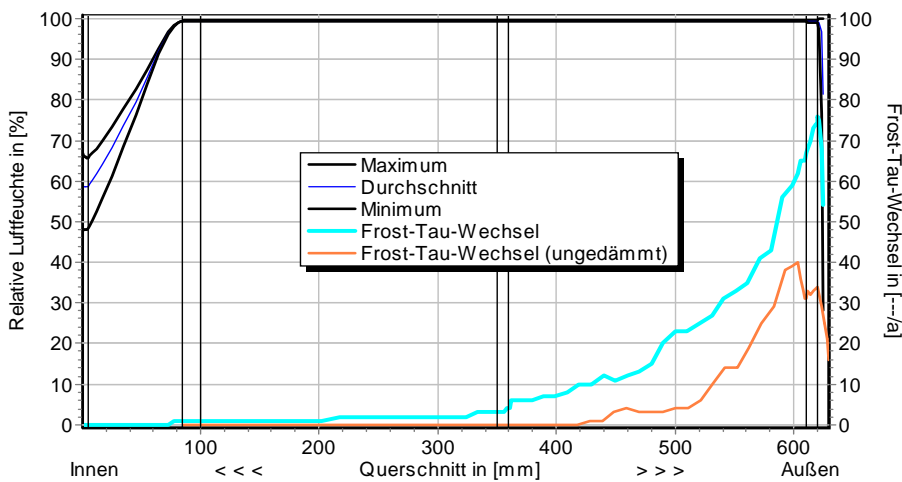


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz



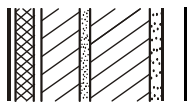
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	16	23	30
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,5	97,9	98,6
	WL_w	%	100	81,8	80,8	84,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	100,6	98,6	97,9
	CIL_{φ}	%	100	124,6	123,2	122,8
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	46	52	56
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	98,6	100,6	101,1
	WL_w	%	100	153,2	155,8	154,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	94,7	96,2	97,0
	CIL_{φ}	%	100	136,7	132,5	127,0



8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle gedämmten Konstruktion erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle gedämmten Konstruktion erfüllen die DIN-Kriterien.

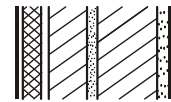
Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss werden alle Grenzwerte bei den sanierten Wandaufbauten eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge bilden sich durchgängig zu hohe Kondensatmengen aus, die Verdunstung des Kondensats ist nicht gewährleistet. Schimmelpilzwachstum ist nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 50 (1½ SL) bzw. 80 mm (2 SL) Dämmdicke (Schlagregensicherheit wegen dichter Konstruktion sorgfältig überprüfen).

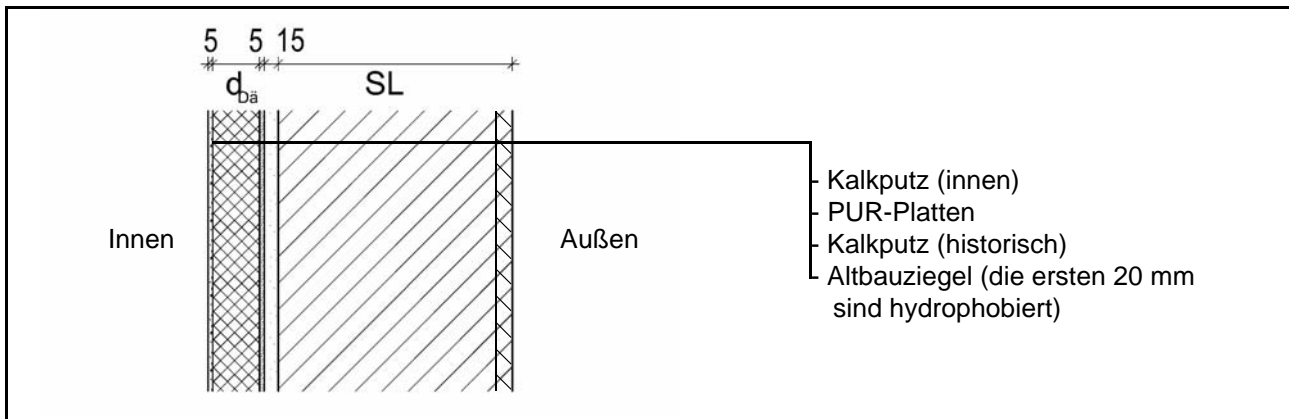
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen hydrophobiert



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50, 80$ mm

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), $1\frac{1}{2}$ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Altbauziegel (hydrophobiert)	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,003

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanieret, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	1,43	2,31	3,55
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,62	0,40	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,099	0,063	0,041
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,449	0,292	0,207
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,781	0,842	0,884

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

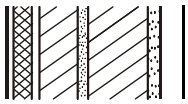
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanieret, 1SL	30mm, 1SL	50mm, 1½SL	80mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	1,43	2,31	3,55
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,62	0,40	0,27
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,050	< 0,001	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,449	0,292	0,207
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	58,2	55,1	53,4

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	3,06	5,06	8,06
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	1,08	1,79	2,86
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	32,8	23,5	9,6



8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit Polyurethanplatten, außen hydrophobiert

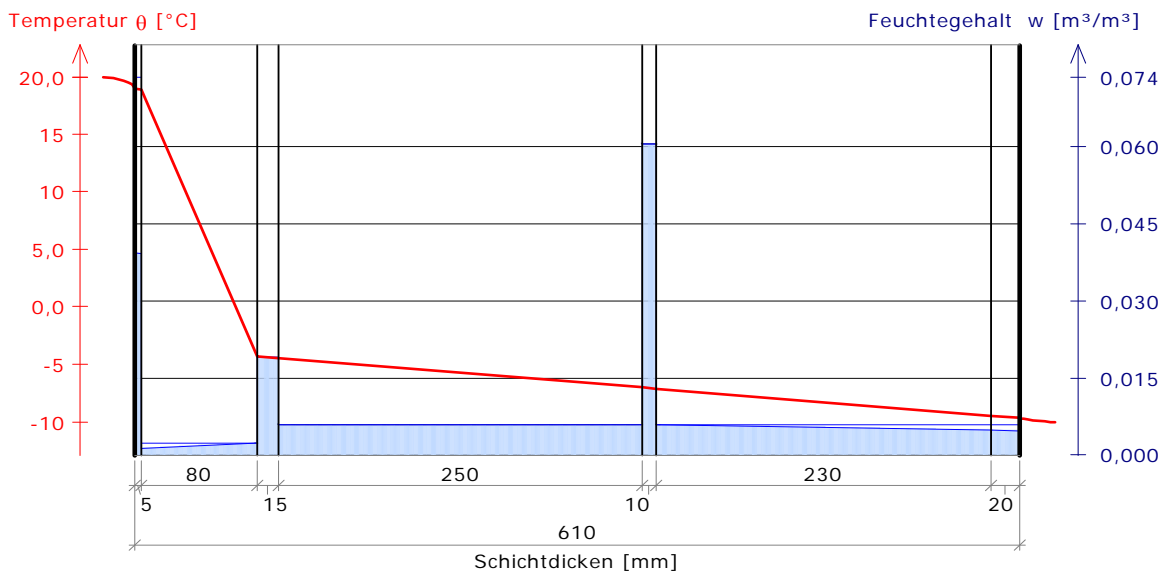
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier, 1SL		30mm, 1SL		50mm, 1½SL		80mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

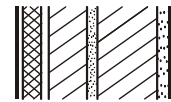
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,9	2190	1169	0,039		
				0,039		
2 Polyurethan-(PUR-)Platten	18,9	2182	1164	0,001		
				0,002	0,0	0,00
3 Kalkputz (historisch)	-4,3	425	425	0,019	15,0	0,00
				0,019		
4 Altbauziegel	-4,5	420	420	0,006	250,0	0,00
				0,006		
5 Lehmörtel (historisch)	-7,0	338	338	0,061	10,0	0,00
				0,061		
6 Altbauziegel	-7,1	334	334	0,006	0,0	0,00
				0,005		
7 Altbauziegel (hydrophobiert)	-9,5	272	223	0,005		
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,7	267	208			
	-10	260	208			



8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen hydrophobiert

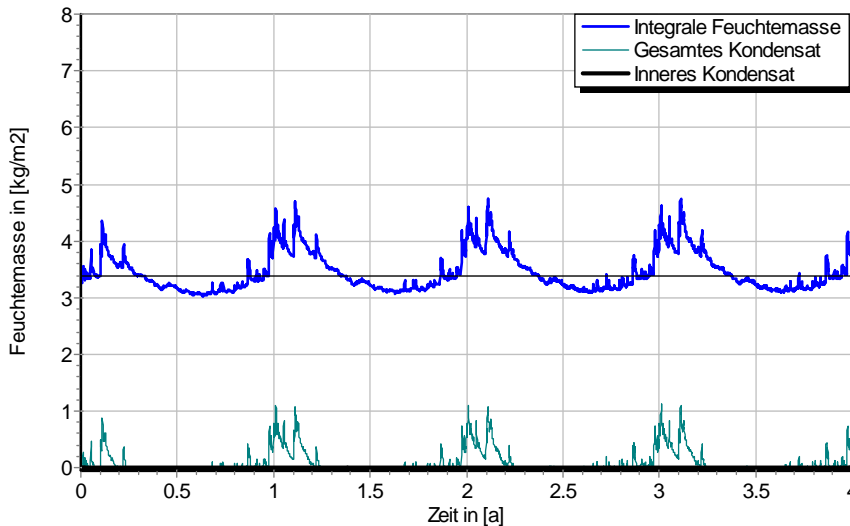


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



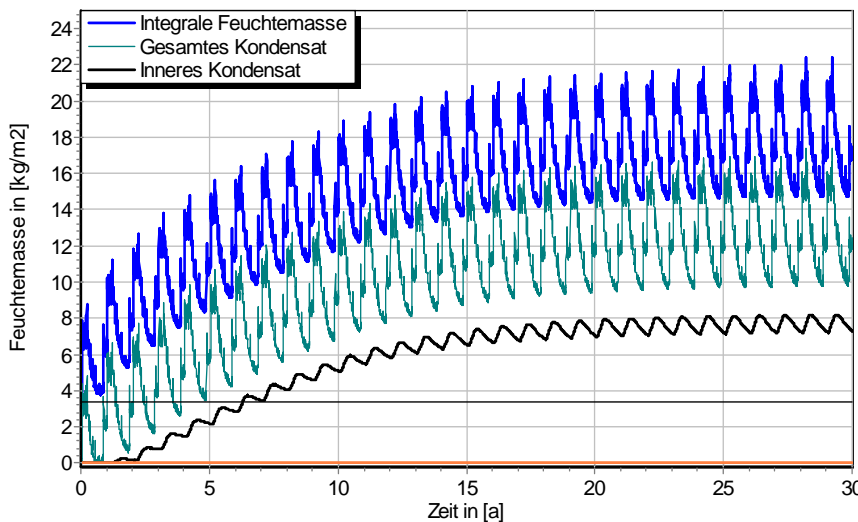
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	0,630	0,946	1,377
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

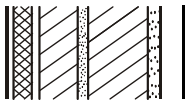


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante (2 SL) in orange

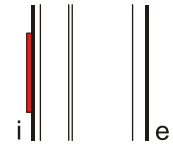
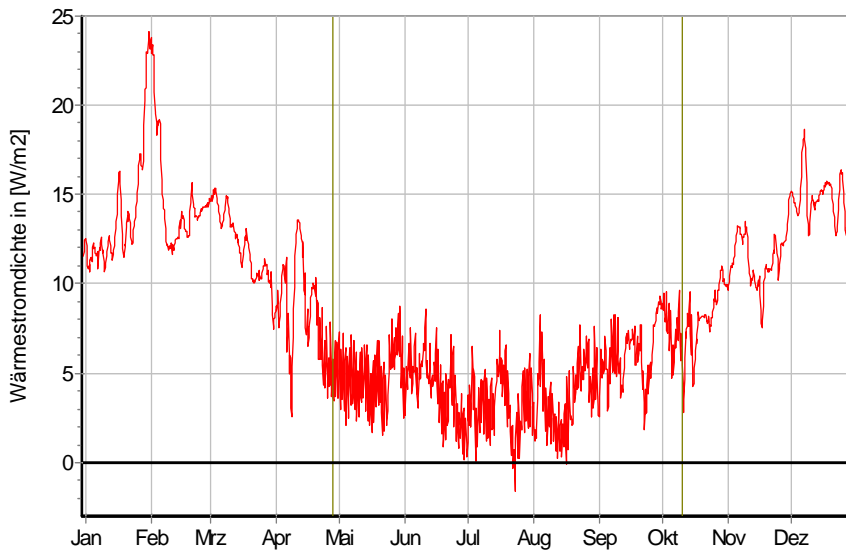
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	30 mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	8,068	12,398	19,024
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	0,693*	3,472*	8,185*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit Polyurethanplatten, außen hydrophobiert

5.2 Instationäre Wärmeverluste

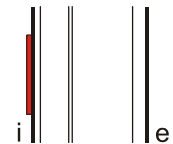
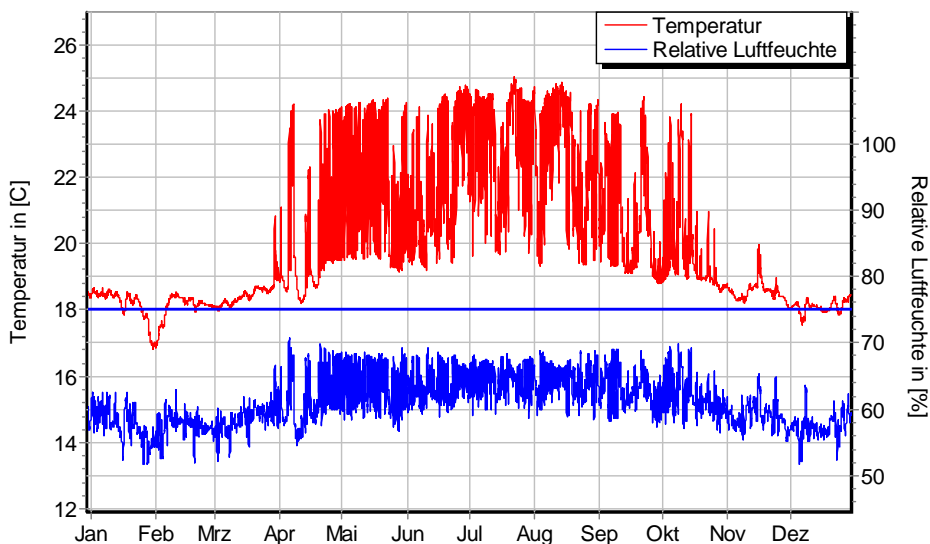


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,9	11,99	7,64	5,07
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,48	0,68	0,43	0,29
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,50	1,30	2,13	3,30

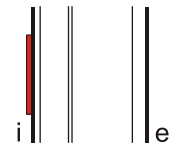
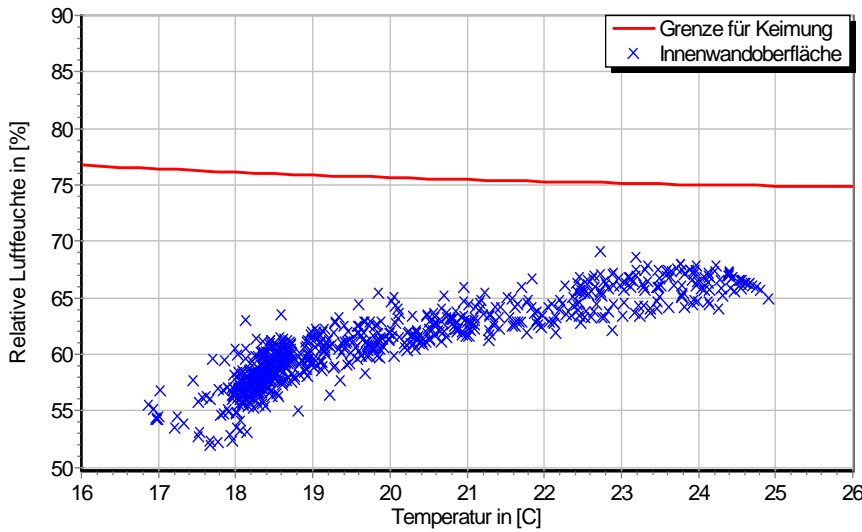
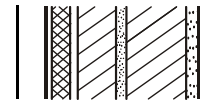
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	30 mm, 1 SL	50 mm, 1½ SL	80 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	11,86	8,11	5,47
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,47	0,67	0,46	0,31
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,51	1,31	2,00	3,05

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

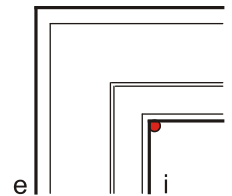
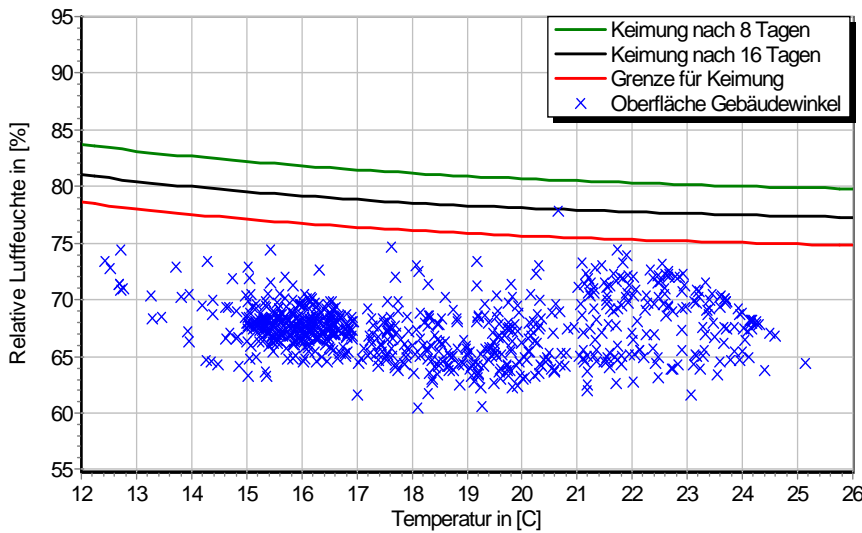


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen hydrophobiert

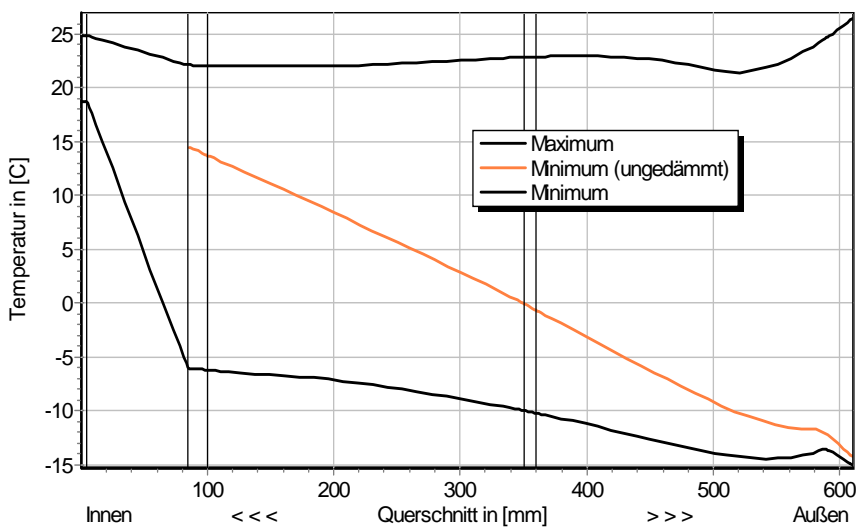


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

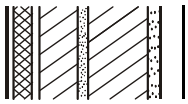


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen

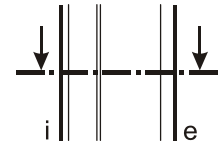
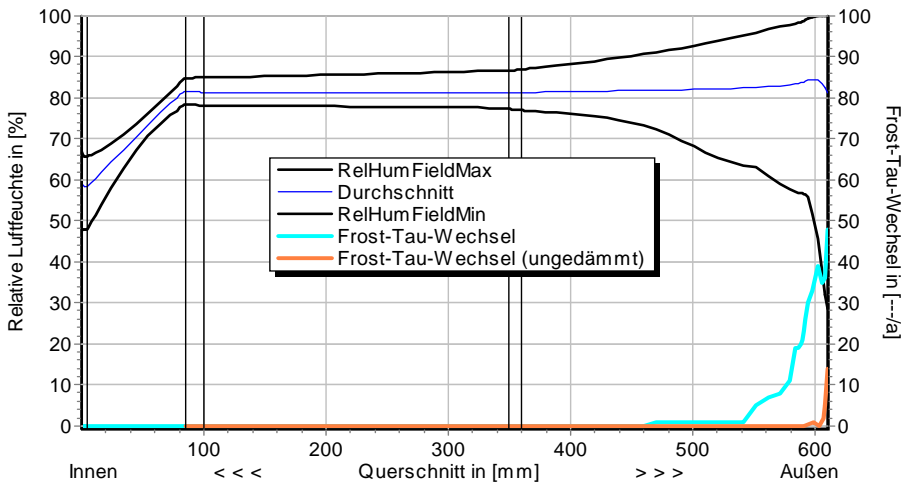
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



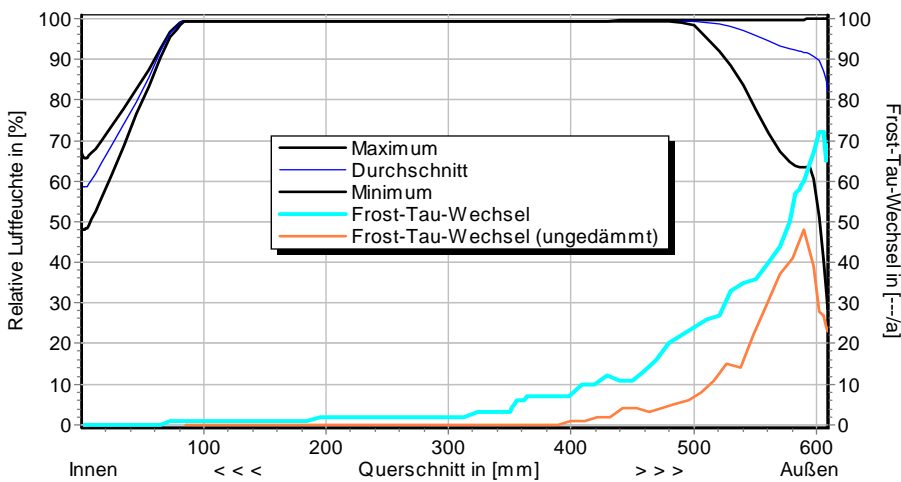
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit Polyurethanplatten, außen hydrophobiert



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)

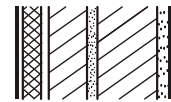


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/\max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	37	45	50
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	94,2	94,7	95,5
	WL_w	%	100	59,4	69,7	69,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,1	97,1	97,8
	CIL_φ	%	100	98,8	98,9	93,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/\max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	62	69	72
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,1	97,8	98,3
	WL_w	%	100	112,2	117,9	116,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	92,7	95,5	97,0
	CIL_φ	%	100	100,1	100,9	100,7

8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen hydrophobiert



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier,1SL	30mm,1SL	50mm,1½SL	80mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle gedämmten Varianten erfüllen die DIN-Kriterien.

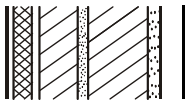
COND: Alle gedämmten Varianten erfüllen die DIN-Kriterien.

Simulation: Ohne Schlagregen werden alle Grenzwerte eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen in allen gedämmten Varianten zu hohe Kondensatmengen, die Verdunstung des Kondensats ist nur mit 50 mm Dämmung (1½ SL) gewährleistet. Schimmelwachstum sind auch bei 30 mm Dämmung (1 SL) nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm (2 SL) Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

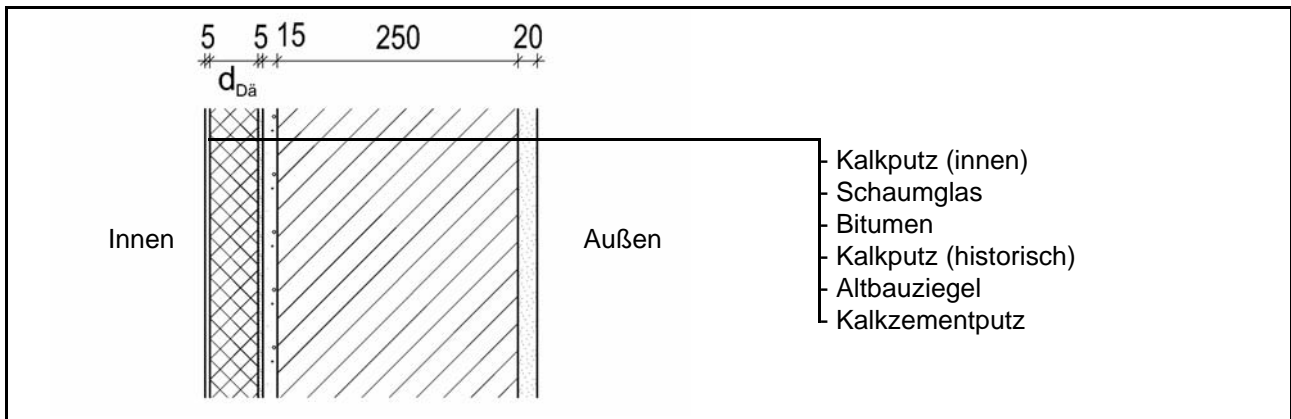
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten, außen unverputzt: 3.1 bis 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1 bis 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1 bis 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1 bis 10.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1 bis 11.3



9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Schaumglas	140	0,045	150000	< 0,001	92,0	-
Bitumen	1200	0,15	15000	< 0,001	0,25	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

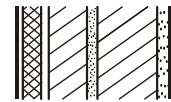
	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	1,06	1,51	2,17
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,81	0,60	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,722	0,779	0,826

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	1,06	1,51	2,17
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,81	0,60	0,43
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	60,9	57,8	55,5
Innendämmsystem:			** feuchteabhängig			
s_d -Wert	s_{di}	m	-	4575	7575	12075
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,71	1,15	1,82
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,3	25,5	12,4

9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



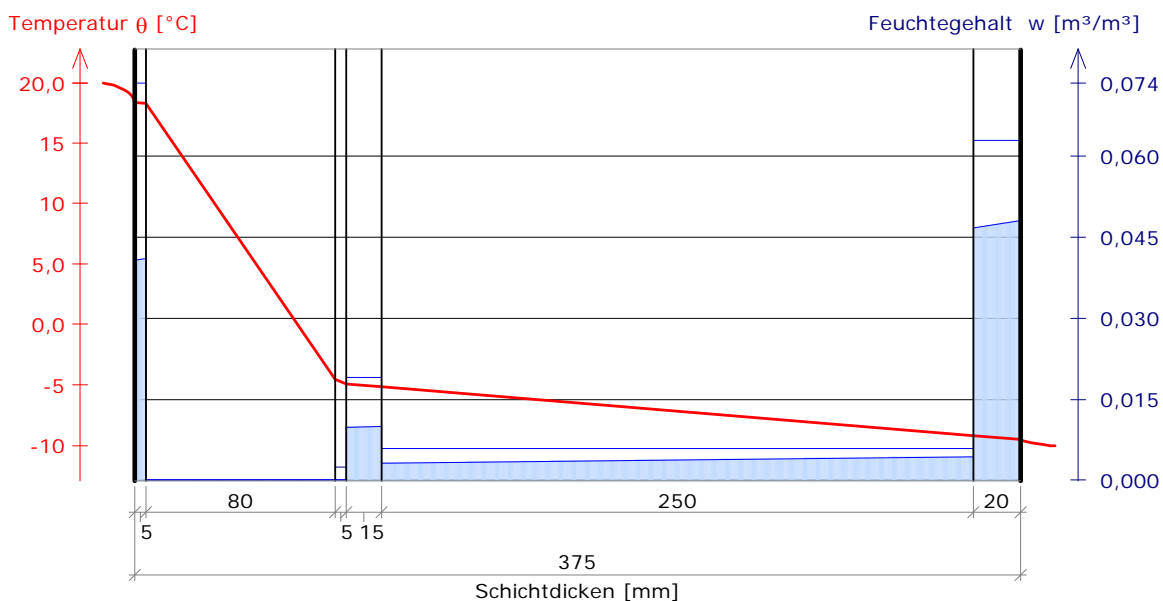
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

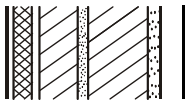
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,3	2108	1169			
	18,3	2097	1169			
2 Schaumglas	-4,5	419	214			
3 Bitumen	-4,9	404	208			
4 Kalkputz (historisch)	-5,2	396	208			
5 Altbauziegel	-9,2	280	208			
6 Kalkzementputz	-9,5	272	208			
Luftschicht (Außenseite)	-10	260	208			





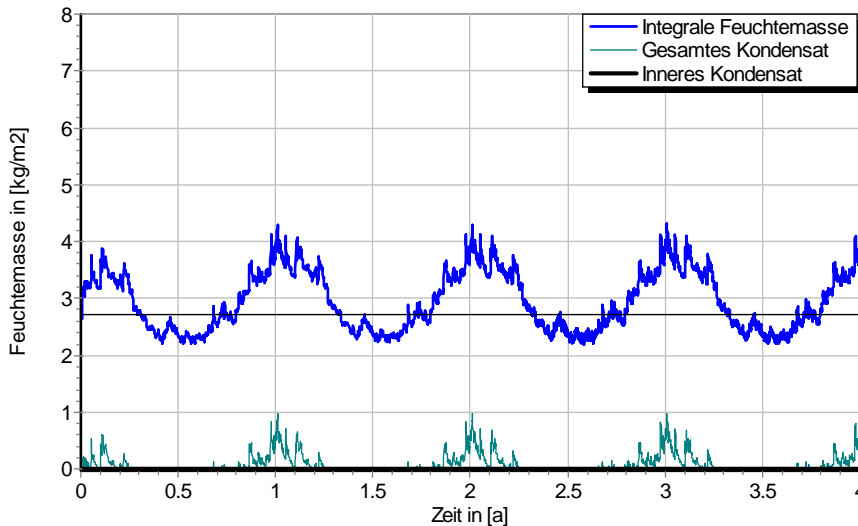
9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



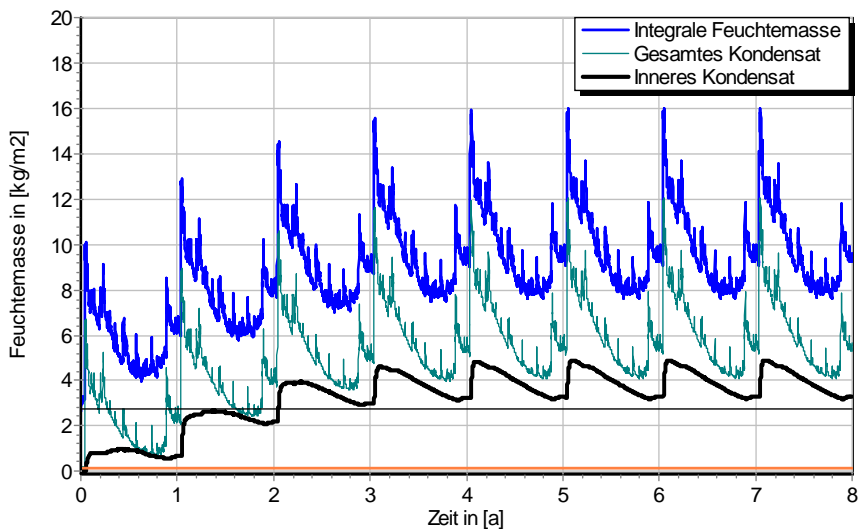
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,990	1,310	1,605
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



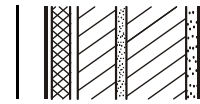
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

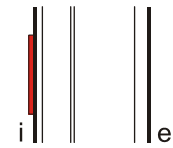
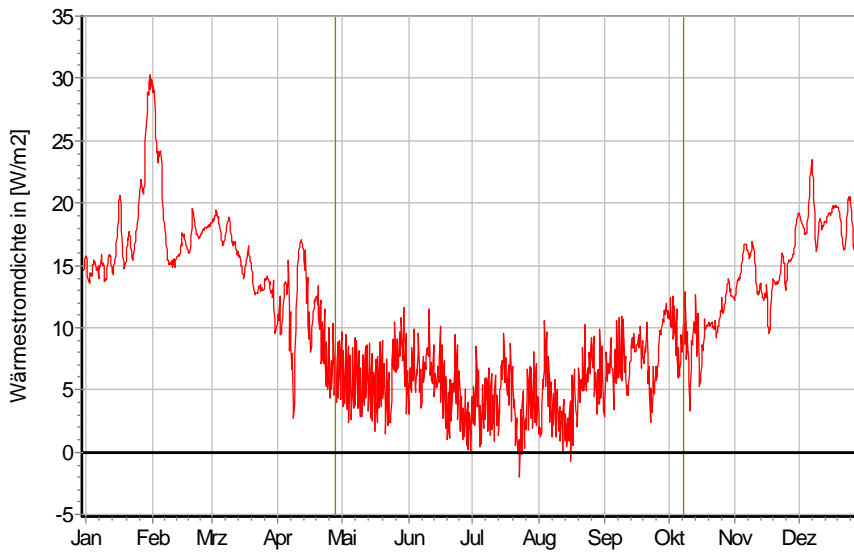
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	11,304	12,335	13,283
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	3,415*	4,200*	4,764*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



5.2 Instationäre Wärmeverluste

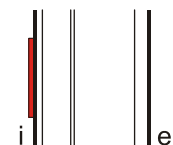
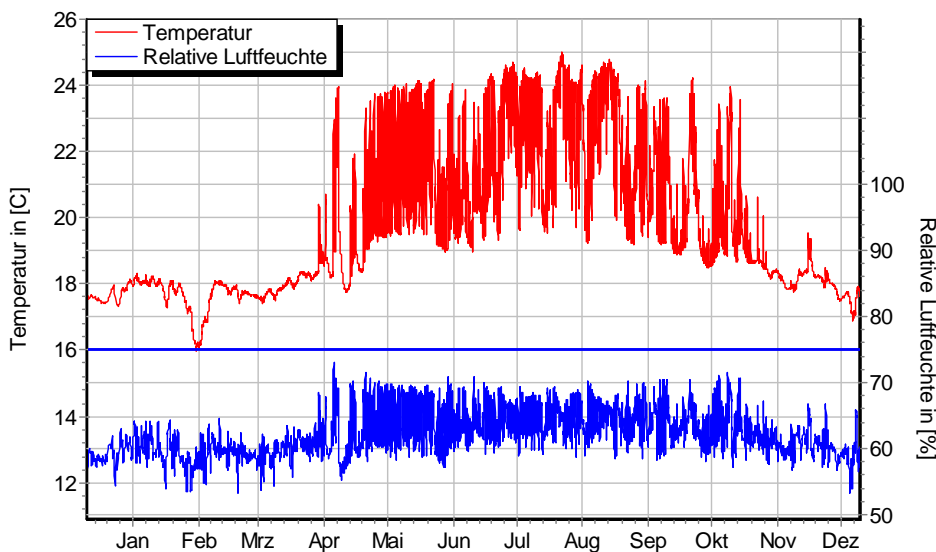


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

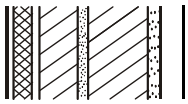
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	15,11	11,08	7,91
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	0,86	0,63	0,45
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	0,99	1,42	2,04

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	14,93	10,94	7,80
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	0,85	0,62	0,44
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	1,01	1,44	2,08

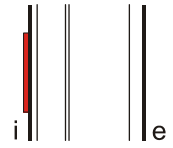
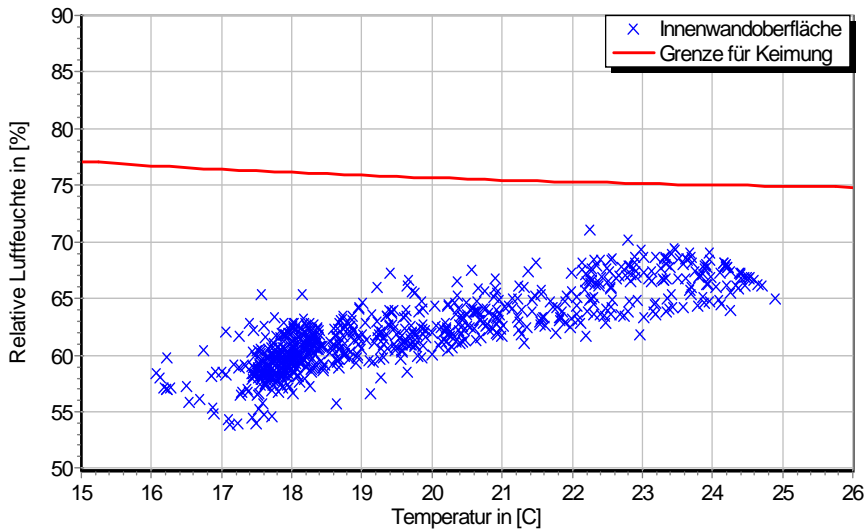
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



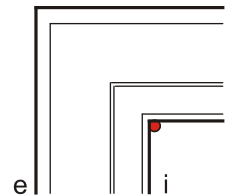
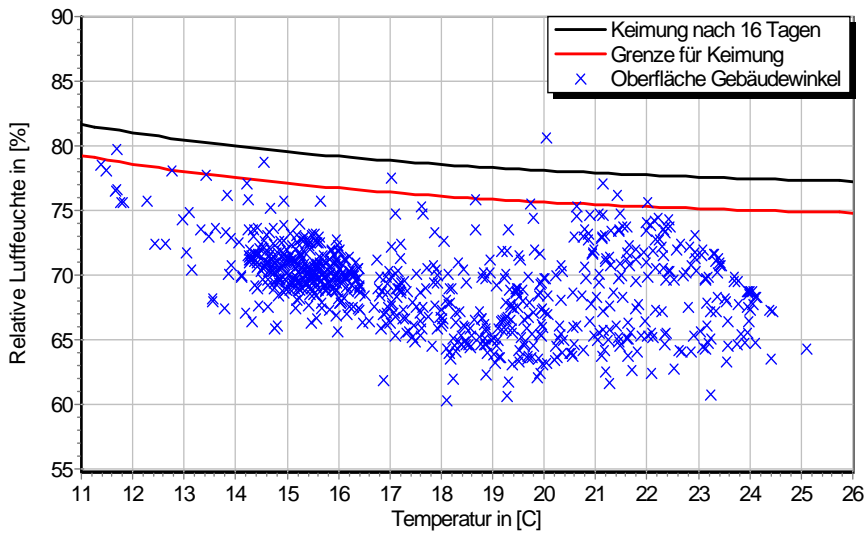
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

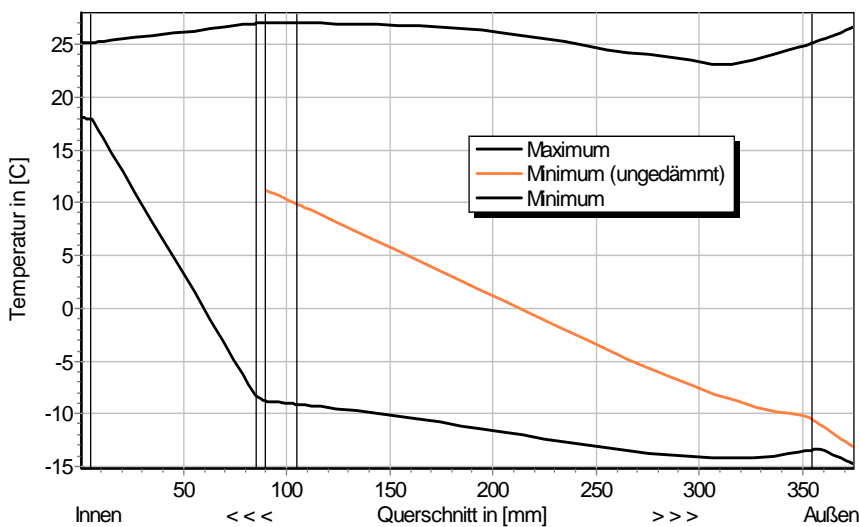


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



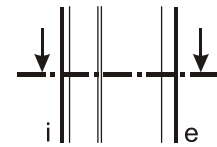
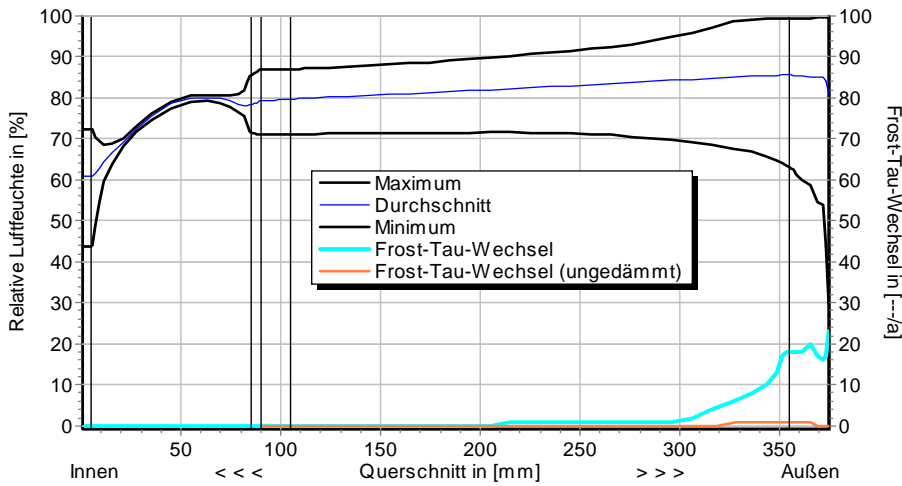
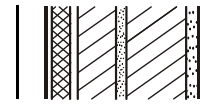
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen.

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

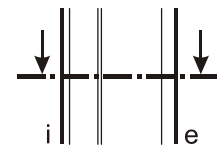
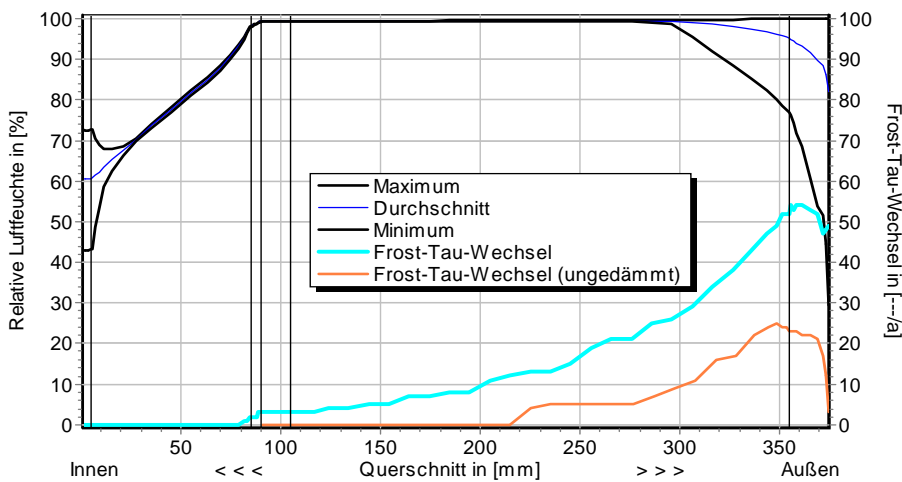


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



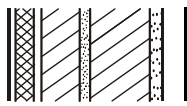
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	16	23	30	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	83,3	82,5	81,9	
	WL_w	%	100	89,7	84,0	81,1	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	103,1	102,7	102,6	
	CIL_{φ}	%	100	95,6	93,7	92,4	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	47	53	59	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	84,9	84,1	83,4	
	WL_w	%	100	106,8	108,6	110,1	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,0	96,1	95,2	
	CIL_{φ}	%	100	111,0	111,8	112,0	



9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Der Mindestwärmeschutz wird ab 50 mm Dämmung eingehalten. Es entsteht kein Kondensat.

COND: Der Mindestwärmeschutz wird ab 50 mm Dämmung eingehalten. Es entsteht kein Kondensat.

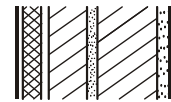
Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 50 mm gegeben. Ohne Schlagregen bildet sich kein inneres Kondensat. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen sehr hohe Kondensatmengen, die während der Trocknungsperiode nicht verdunsten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist bei keiner der gedämmten Konstruktionen zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

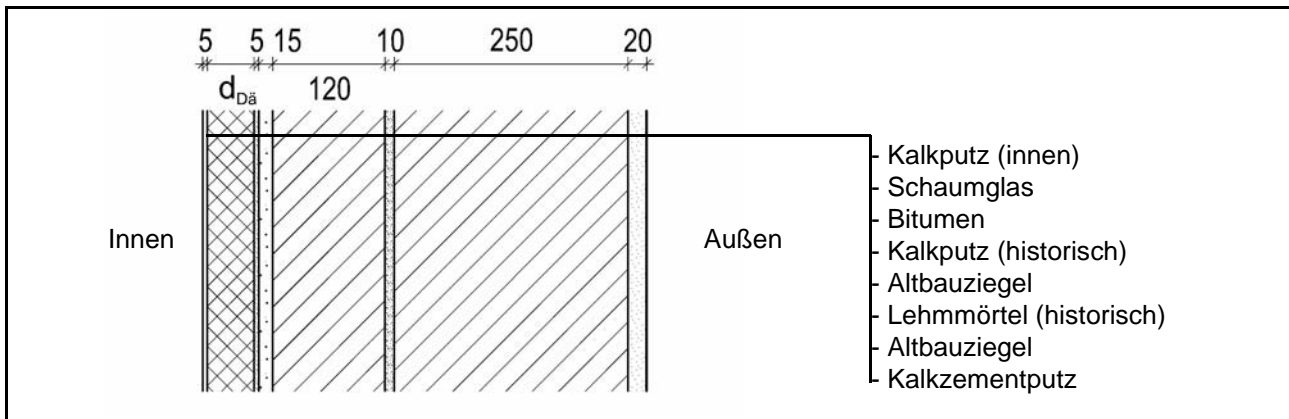
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewollplatten: 6.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Schaumglas	140	0,045	150000	< 0,001	92,0	-
Bitumen	1200	0,15	15000	< 0,001	0,25	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

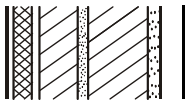
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,52	1,23	1,67	2,34
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,45	0,72	0,54	0,40
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,537	0,742	0,791	0,833

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,52	1,23	1,67	2,34
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,45	0,72	0,54	0,40
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	71,5	59,5	57,1	55,1
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	4575	7575	12075
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,71	1,15	1,82
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,3	25,5	12,4



9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

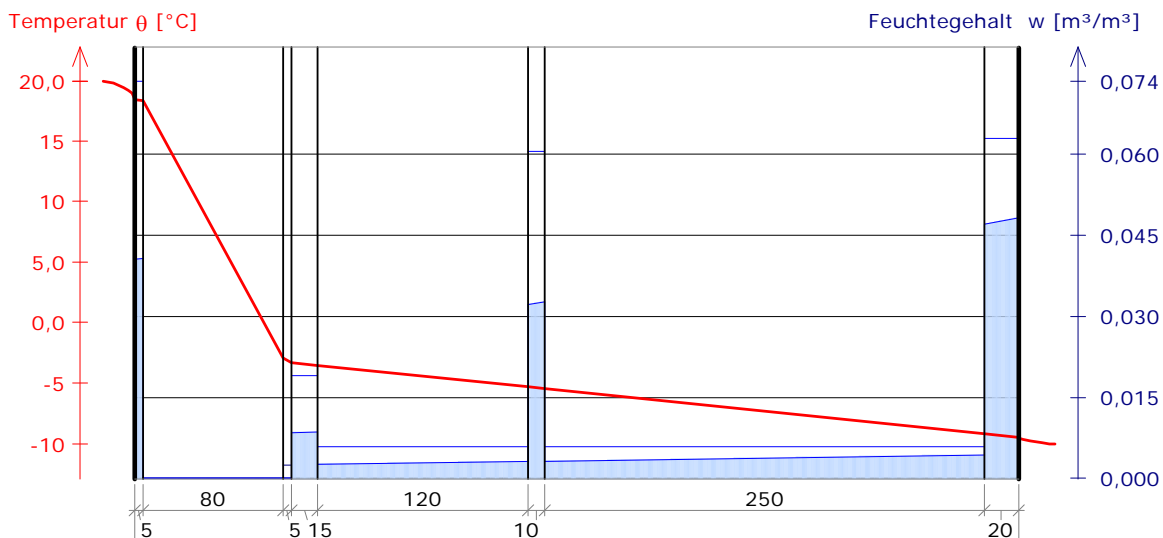
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

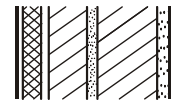
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

	Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
	Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
		18,4	2123	1169			
1	Kalkputz (innen)						
		18,4	2112	1169			
2	Schaumglas						
		-2,9	480	214			
3	Bitumen						
		-3,3	464	208			
4	Kalkputz (historisch)						
		-3,5	456	208			
5	Altbauziegel						
		-5,3	391	208			
6	Lehmmörtel (historisch)						
		-5,5	386	208			
7	Altbauziegel						
		-9,2	278	208			
8	Kalkzementputz						
		-9,5	271	208			
	Luftschicht (Außenseite)	-10	260	208			



9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

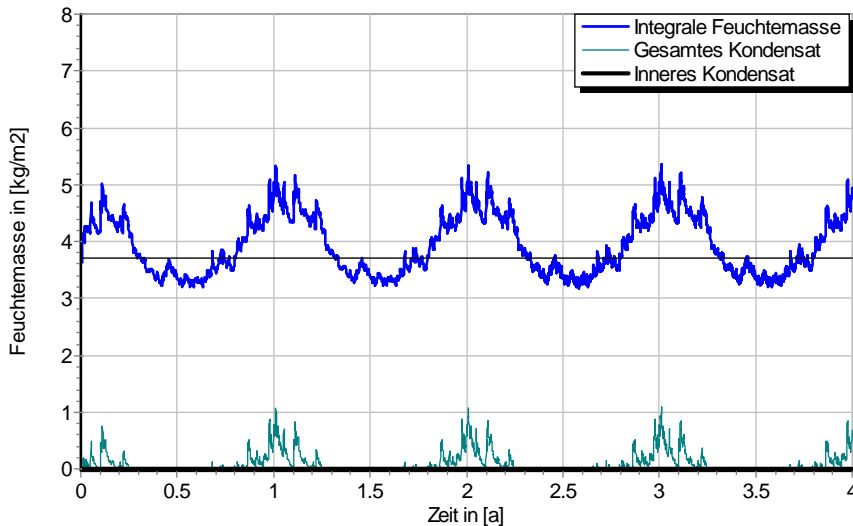


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



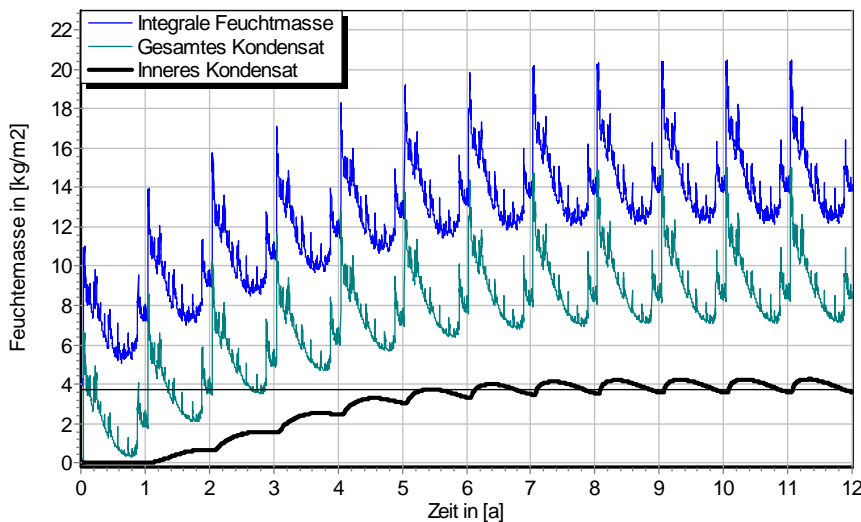
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

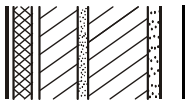
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,935	1,006	1,324	1,657
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



$\Delta m_{W,80}$

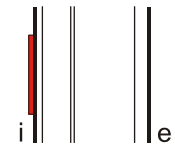
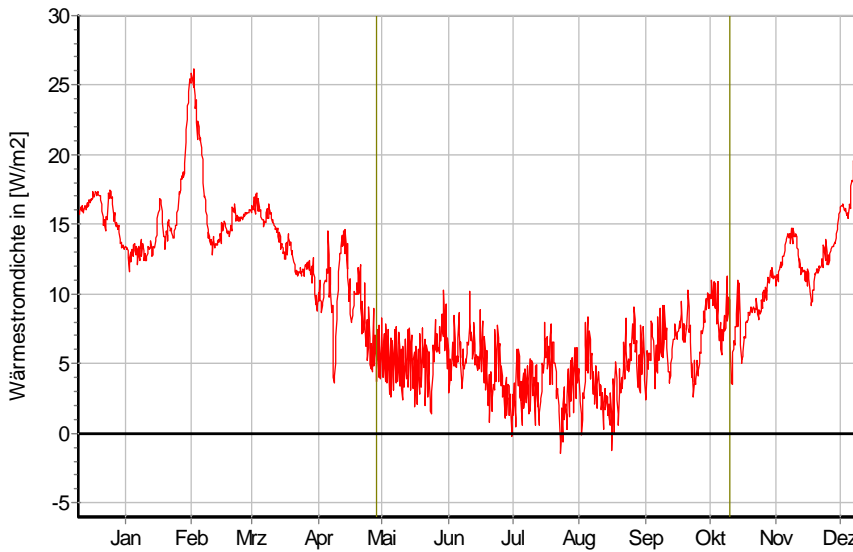
Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanziert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,372	14,223	15,681	16,783
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	3,070	3,802	4,256



9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

5.2 Instationäre Wärmeverluste

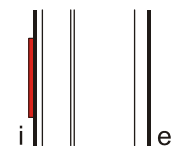
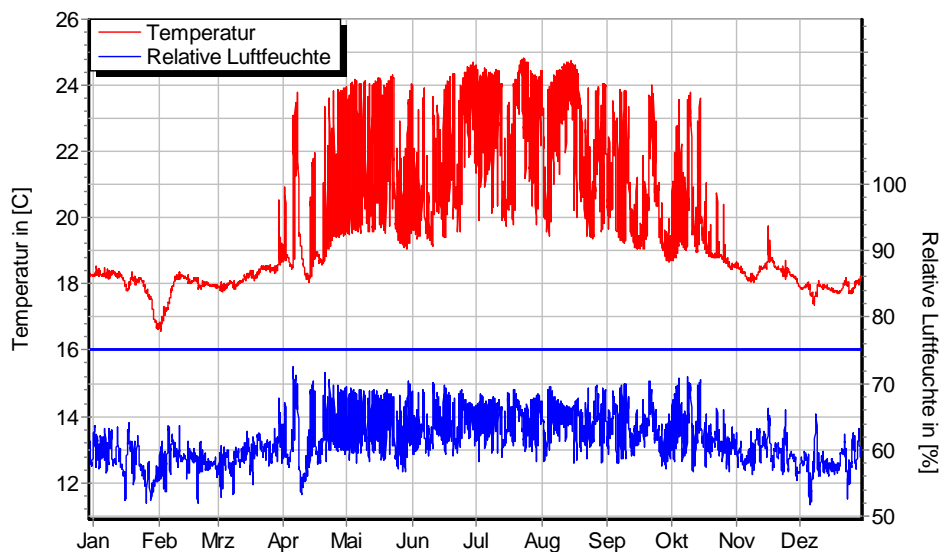


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,55	13,30	10,08	7,39
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,51	0,76	0,57	0,42
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,49	1,15	1,58	2,21

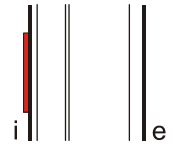
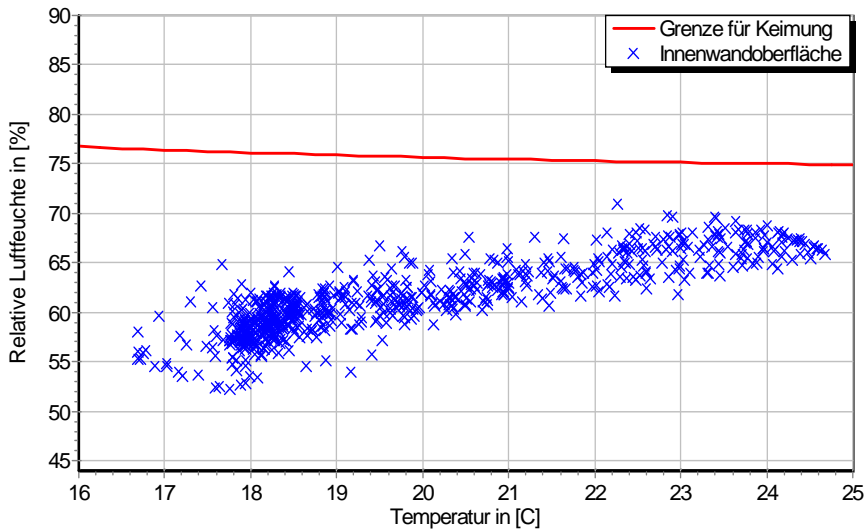
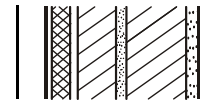
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,18	13,17	9,97	7,30
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,49	0,75	0,57	0,41
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,50	1,17	1,59	2,24

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

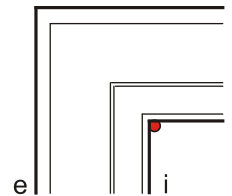
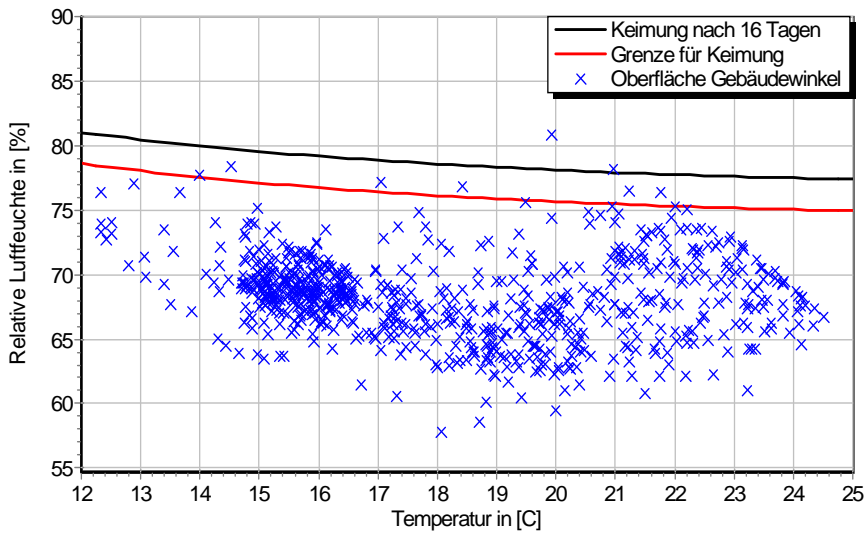


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 30$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

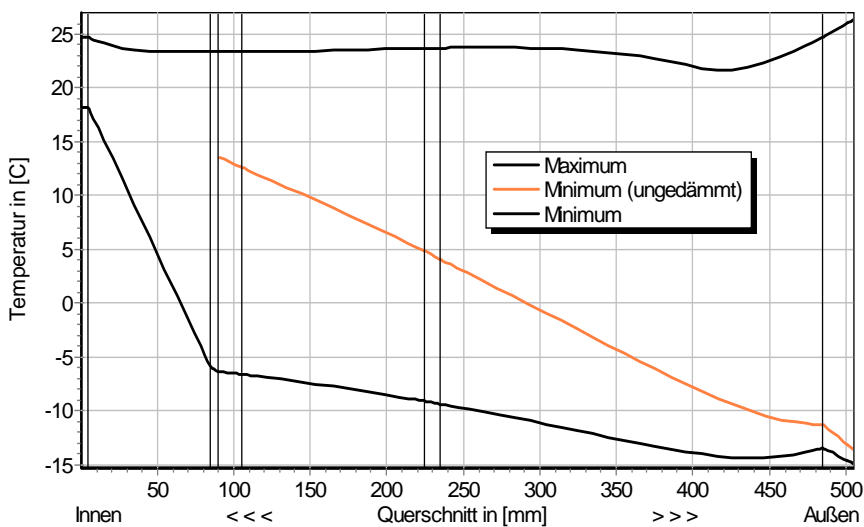


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

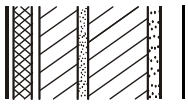


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen.

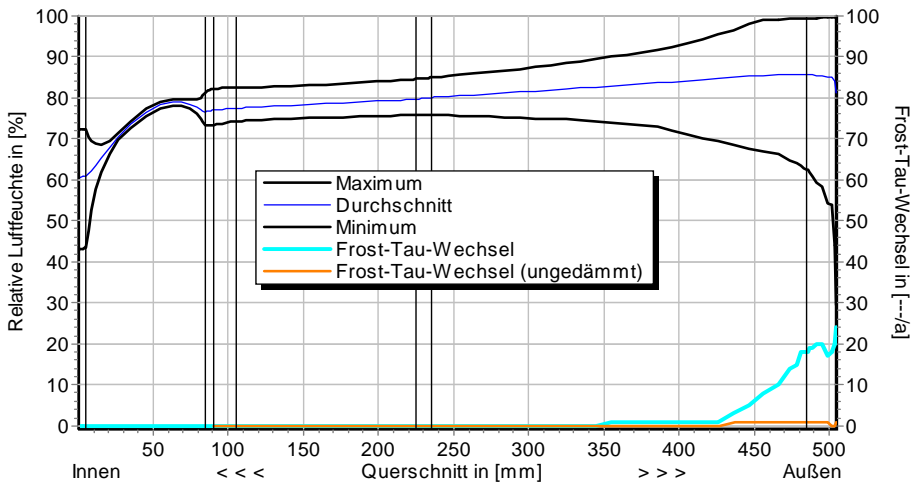
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



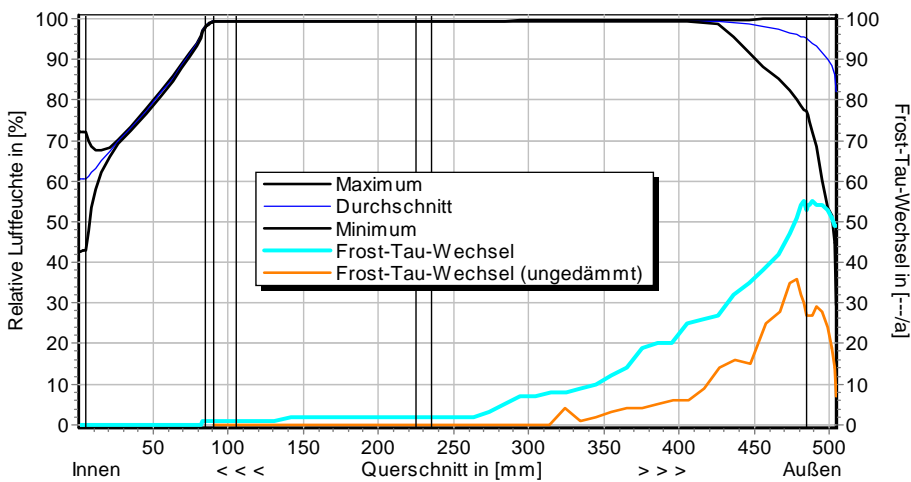
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

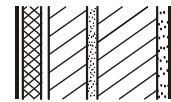


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	19	25	31
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	84,5	84,0	83,6
	WL_w	%	100	86,3	82,4	79,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,2	101,1	101,0
	CIL_φ	%	100	95,5	93,8	92,4
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	27	50	56	60
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	86,1	84,9	84,3
	WL_w	%	100	107,0	105,6	106,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,2	97,3	97,4
	CIL_φ	%	100	108,8	106,8	113,6

9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
Schlagregenexponiert (West)					
	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle DIN-Anforderungen werden eingehalten.

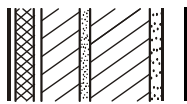
COND: Alle DIN-Anforderungen werden eingehalten.

Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird mit 30 mm Dämmung knapp nicht erfüllt. Ohne Schlagregen bildet sich kein inneres Kondensat. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen sehr hohe Kondensatmengen, die während der Trocknungsperiode nicht verdunsten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist bei keiner der gedämmten Konstruktionen zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

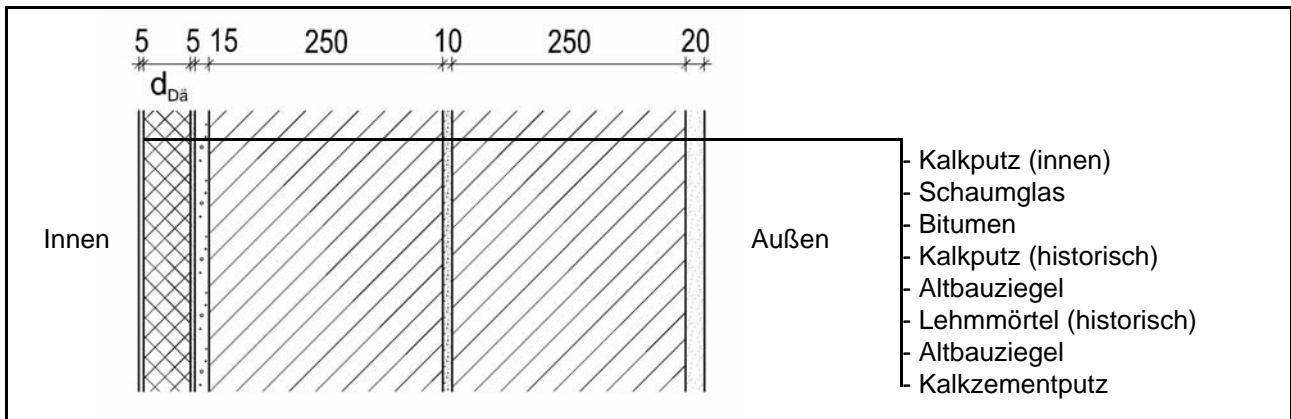
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.2
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.5
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 30, 50$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_W
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Schaumglas	140	0,045	150000	< 0,001	92,0	-
Bitumen	1200	0,15	15000	< 0,001	0,25	-
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

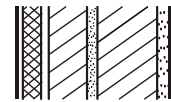
	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,68	1,39	1,83	2,50
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,18	0,64	0,50	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,590	0,759	0,802	0,840

* mit $R_{si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,68	1,39	1,83	2,50
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,18	0,64	0,50	0,37
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	58,5	56,4	54,8
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	4575	7575	12075
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,71	1,15	1,82
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,3	25,5	12,4

9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



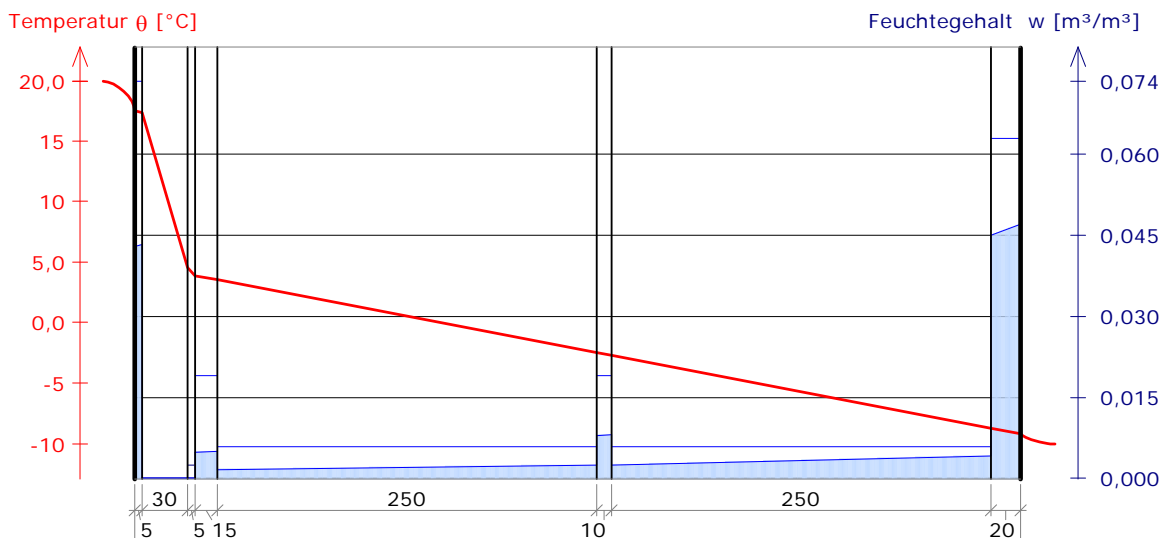
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

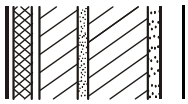
	Bedingung	Unsaniiert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,5	2000	1169			
2 Schaumglas	17,4	1984	1169			
3 Bitumen	4,5	845	225			
4 Kalkputz (historisch)	3,9	807	209			
5 Altbauziegel	3,5	787	209			
6 Kalkputz (historisch)	-2,5	497	208			
7 Altbauziegel	-2,7	487	208			
8 Kalkzementputz	-8,7	290	208			
Luftschicht (Außenseite)	-9,2	278	208			
	-10	260	208			





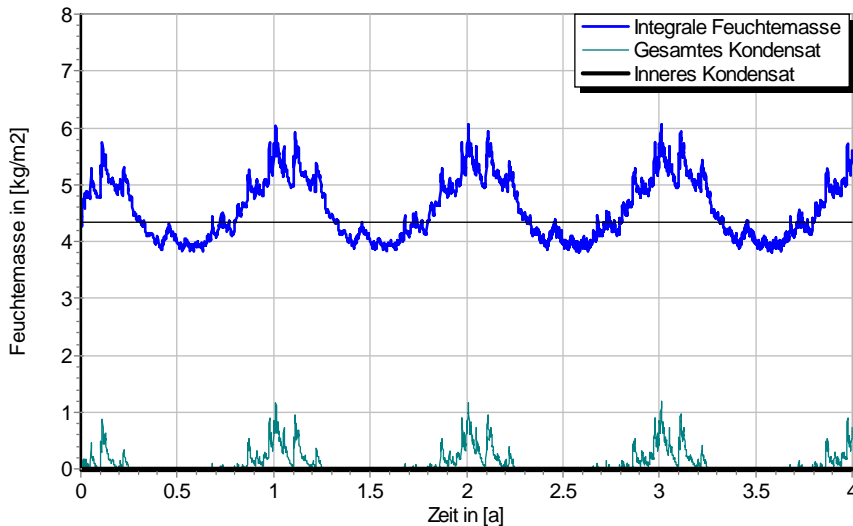
9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



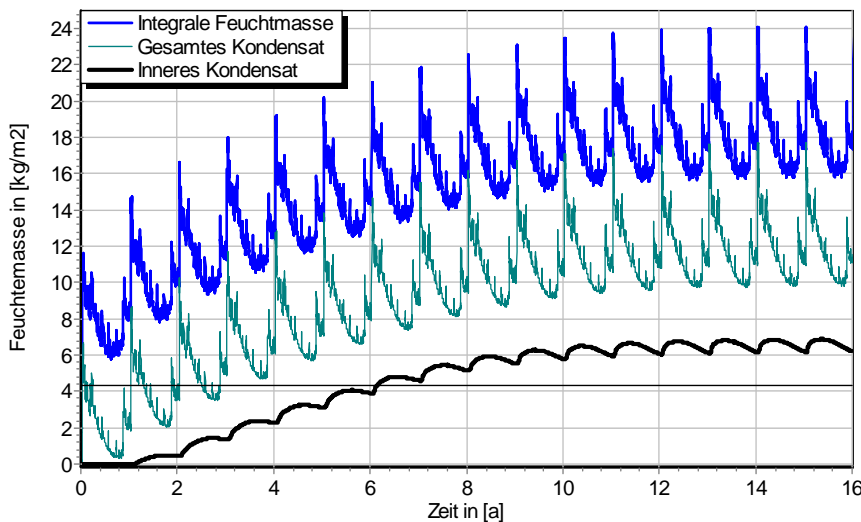
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	1,130	1,096	1,395	1,741
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

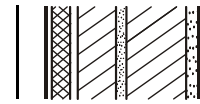


$\Delta m_{W,80}$

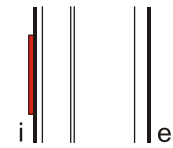
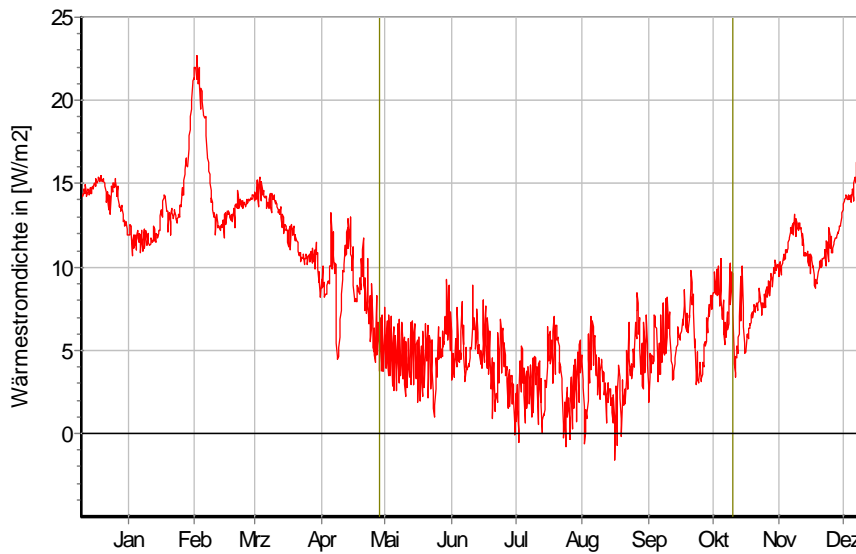
Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm,
 schlagregensexponiert
 (West)

Schlagregensexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,857	16,466	18,443	19,845
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	4,777	6,078	6,917

9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



5.2 Instationäre Wärmeverluste

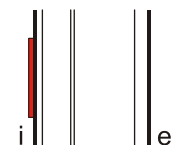
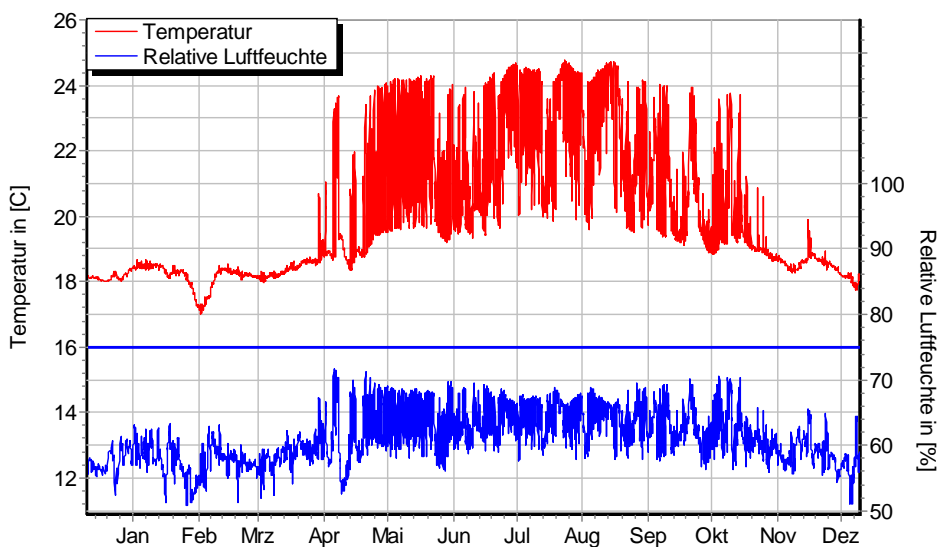


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

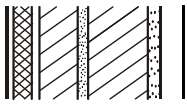
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,48	11,90	9,25	6,94
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,22	0,68	0,53	0,39
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,65	1,31	1,73	2,36

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,17	11,80	9,16	6,86
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,20	0,67	0,52	0,39
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,66	1,32	1,75	2,39

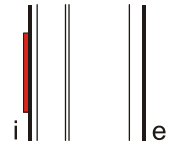
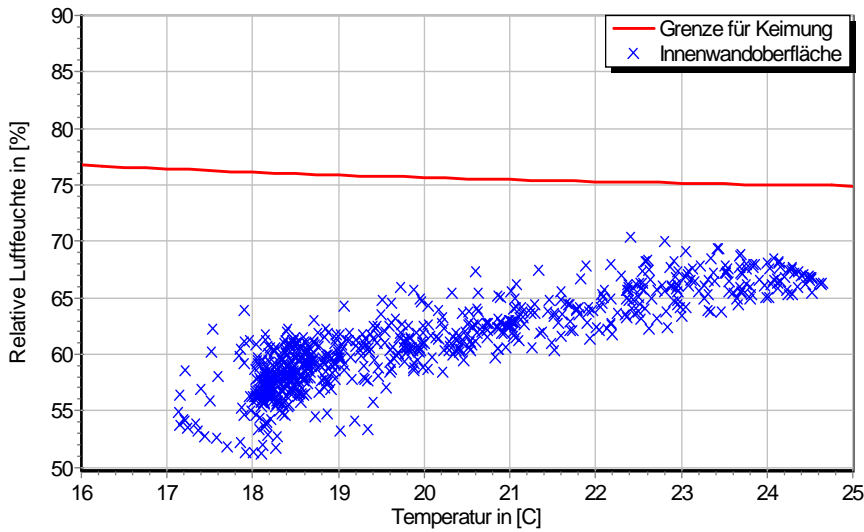
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



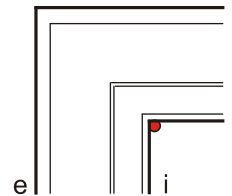
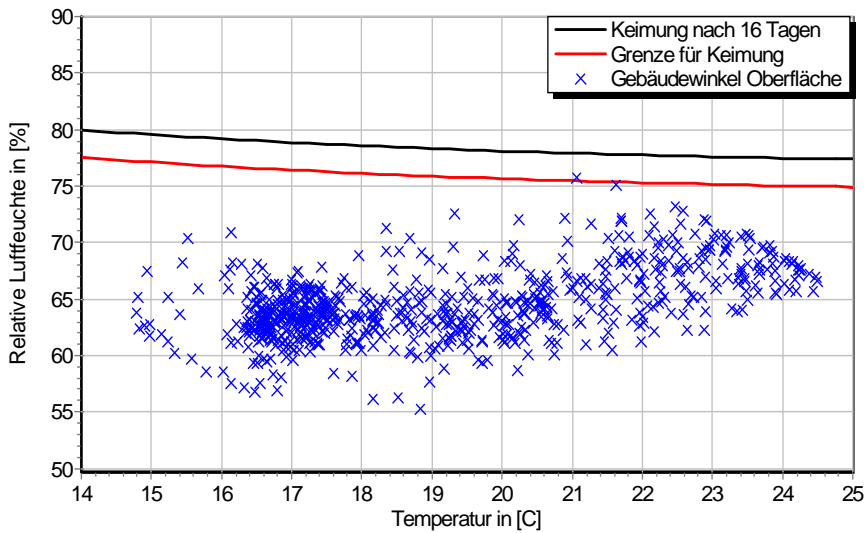
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

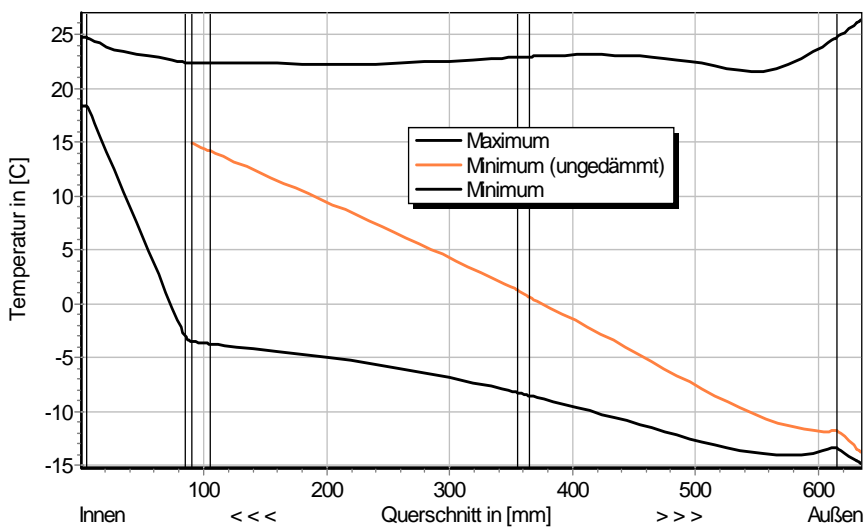


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



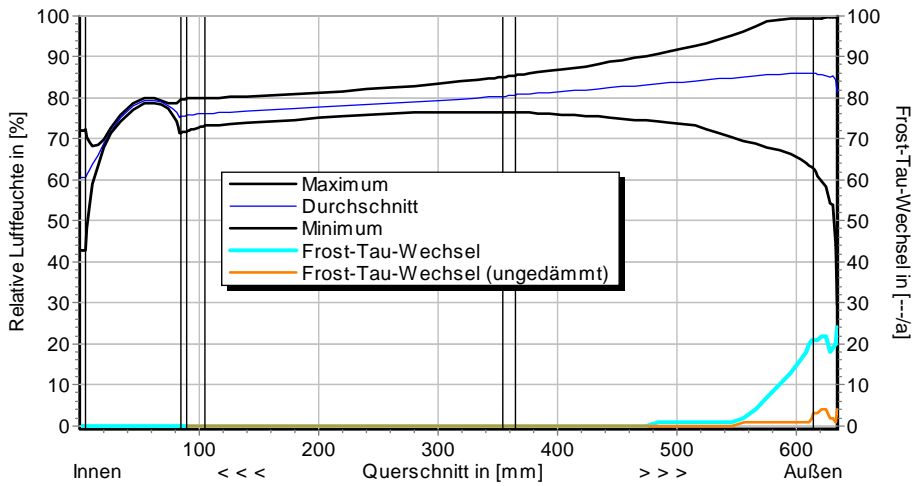
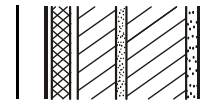
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 30 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen.

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

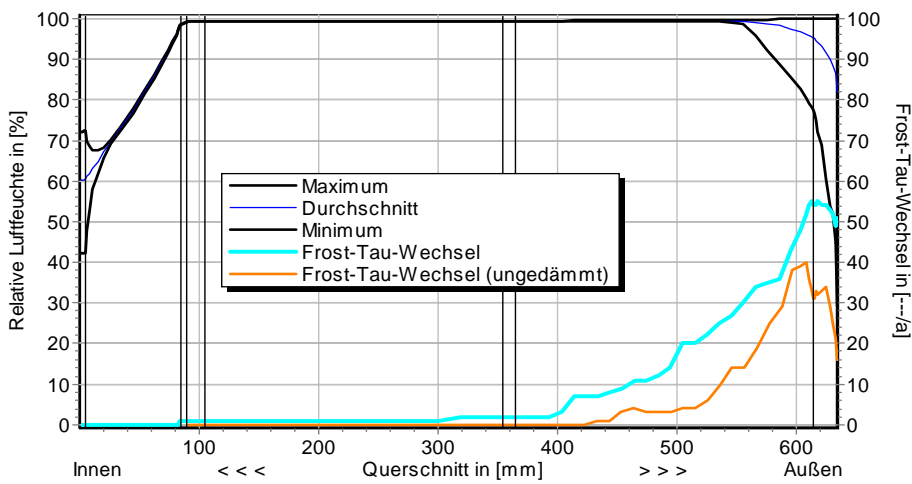


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas



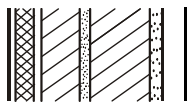
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	8	22	27	32
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	85,4	85,0	84,7
	WL_w	%	100	87,7	85,0	84,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	100,4	101,0	100,9
	CIL_φ	%	100	95,5	94,1	92,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	30 mm	50 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	36	53	57	60
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	86,7	86,2	85,8
	WL_w	%	100	105,8	106,8	107,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,1	97,9	97,5
	CIL_φ	%	100	105,9	106,1	106,2



9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	30 mm	50 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle DIN-Anforderungen werden eingehalten.

COND: Alle DIN-Anforderungen werden eingehalten.

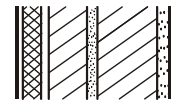
Simulation: Der Mindestwärmeschutz wird mit allen gedämmten Konstruktionen erfüllt. Ohne Schlagregen bildet sich kein inneres Kondensat. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen sehr hohe Kondensatmengen, die während der Trocknungsperiode nicht verdunsten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist bei keiner der gedämmten Wandaufbauten zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 50 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

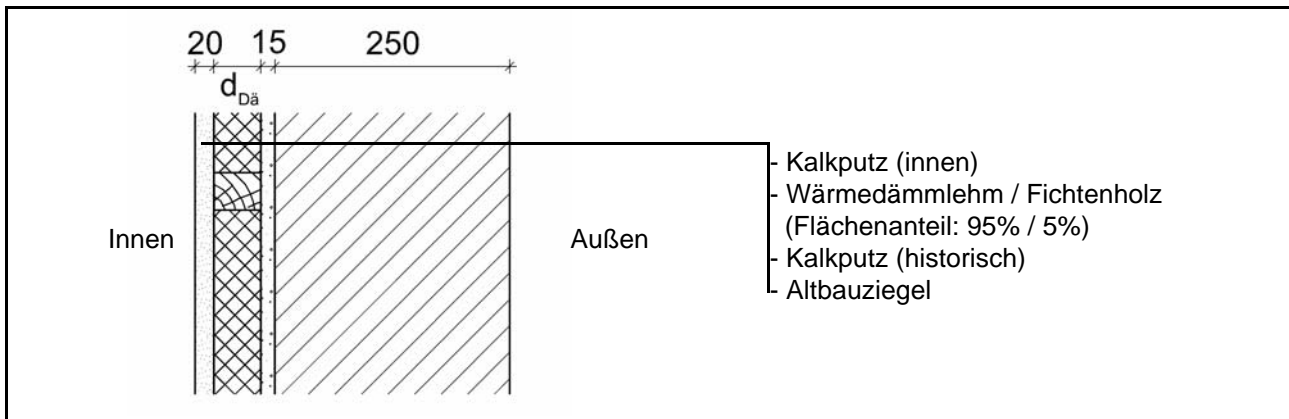
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.6
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 50, 80 und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Wärmedämmlehm (MW)	460	0,080	19,8	2,8	58,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

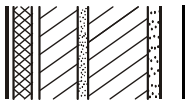
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,33	0,97	1,34	1,58
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	2,00	0,88	0,66	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,407	0,325	0,282
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,527	0,370	0,312
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,689	0,741	0,763

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,33	0,97	1,34	1,58
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	2,00	0,88	0,67	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,344	0,263	0,219
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,527	0,370	0,312
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	62,0	58,8	57,5
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,75	2,67	3,05
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,64	1,01	1,25
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	29,2	19,8	19,8



10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

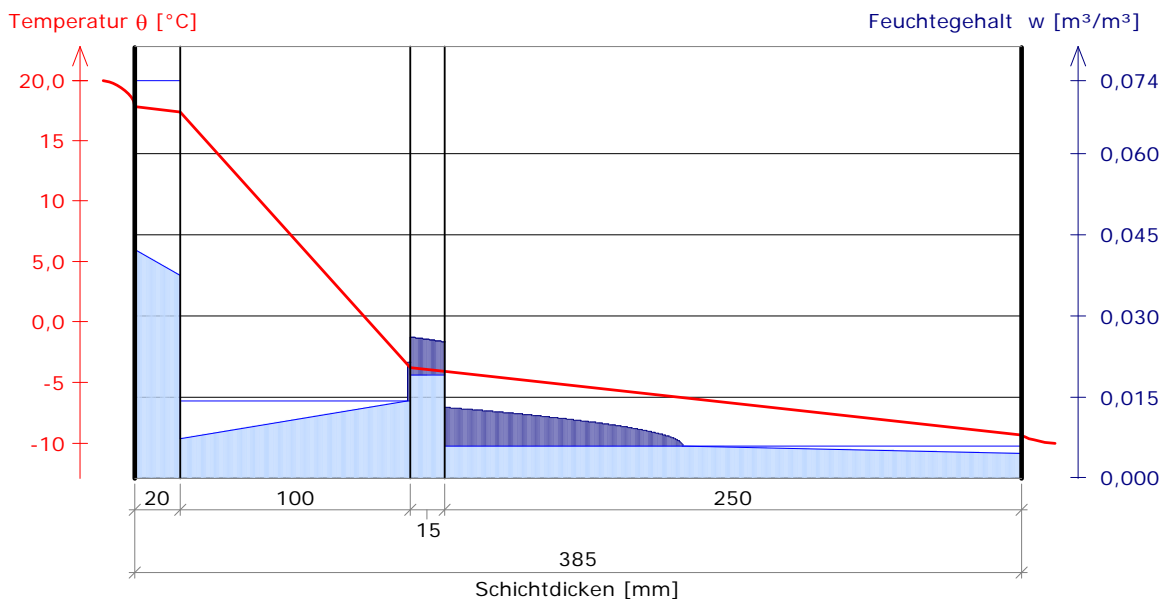
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		50 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

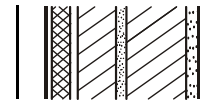
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$, Schnitt durch das Feld (Wärmedämmlehm)

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,8	2039	1169	0,042		
				0,038		
2 Wärmedämmlehm MW (Kork)	17,4	1982	1010	0,007		
				0,021	0,3	0,00
3 Kalkputz (historisch)	-3,8	447	447	0,026	15,0	0,10
				0,025		
4 Altbauziegel	-4,1	435	435	0,013	103,1	0,49
				0,004		
Luftschicht (Außenseite)	-9,3	276	208			
	-10	260	208			



10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

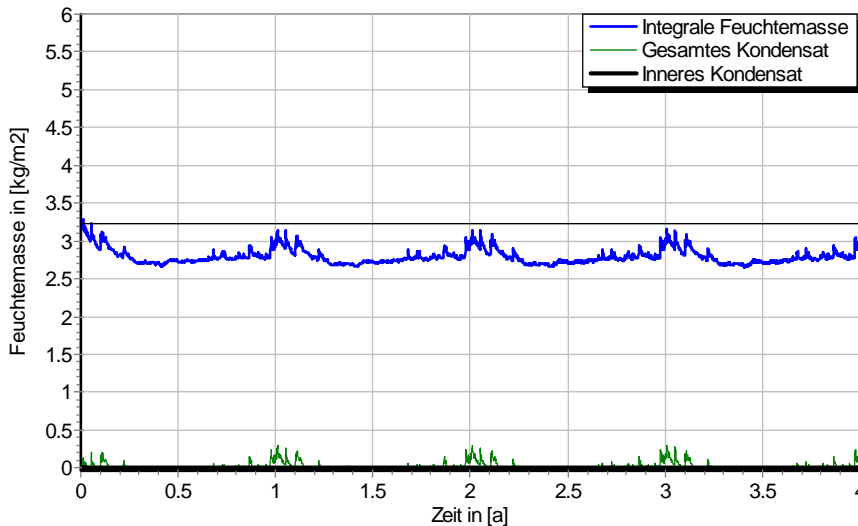


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



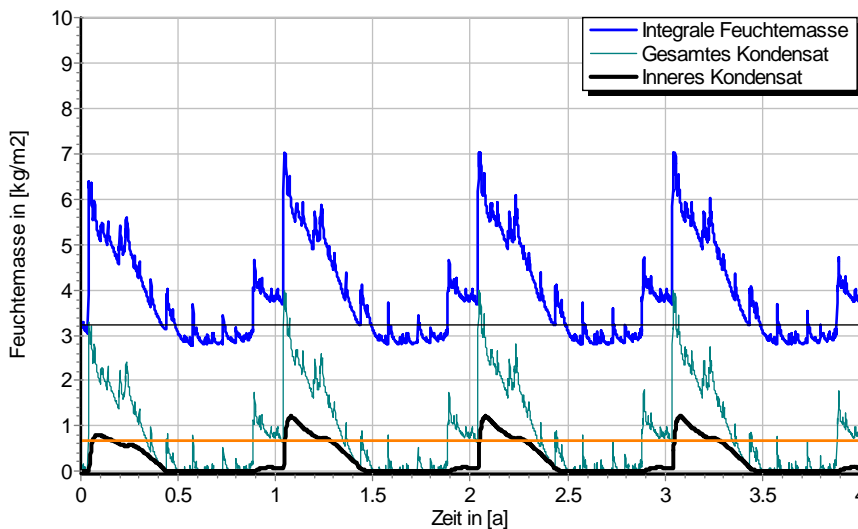
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	-0,125	-0,100	-0,086
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

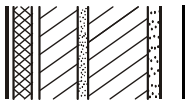


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 100$ mm,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante in orange

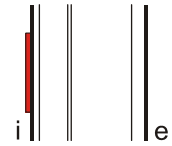
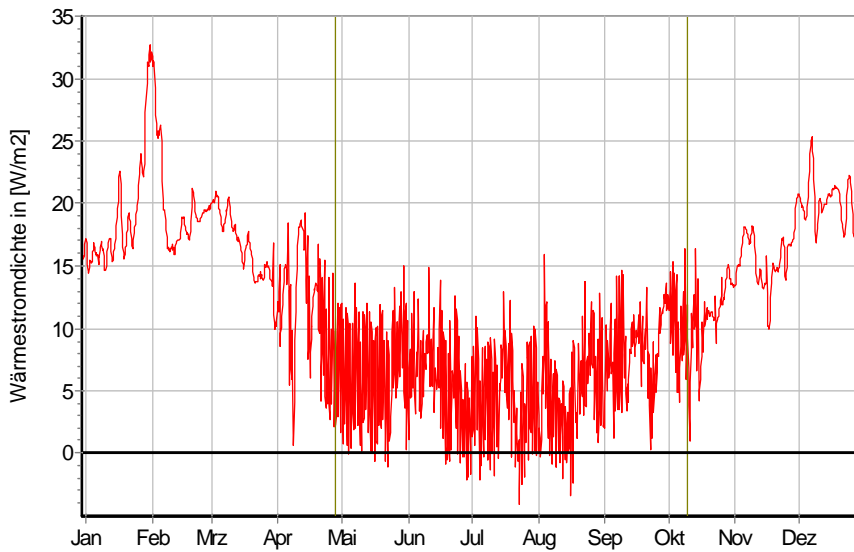
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	3,523	3,705	3,805
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	0,222*	0,427*	0,532*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

5.2 Instationäre Wärmeverluste

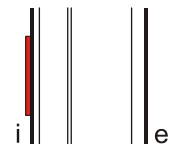
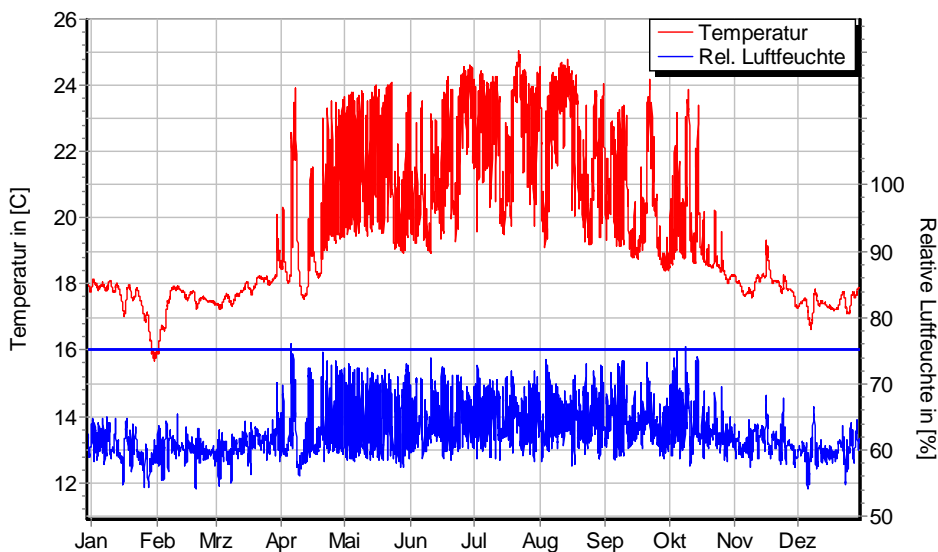


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	16,30	12,34	10,62
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,53	0,93	0,70	0,60
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,48	0,91	1,26	1,49

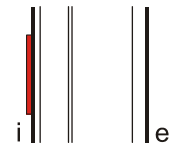
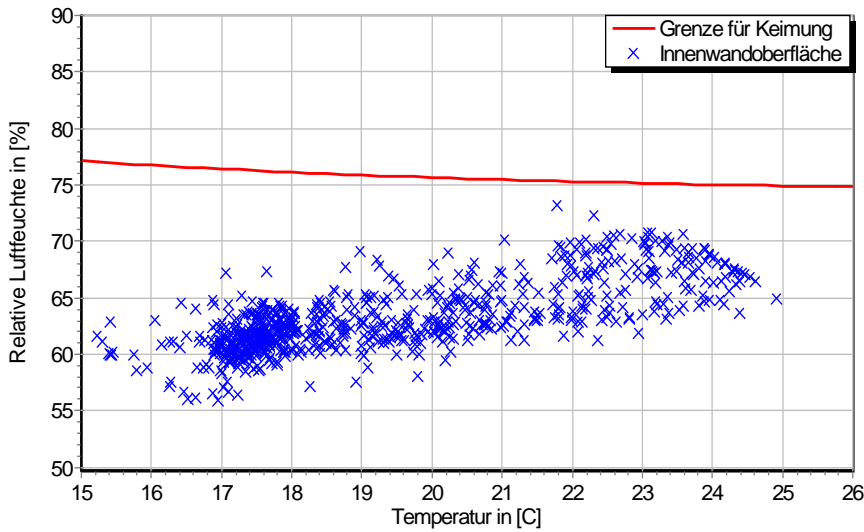
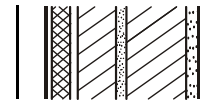
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	16,30	12,41	10,72
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,52	0,93	0,71	0,61
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,49	0,91	1,25	1,47

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

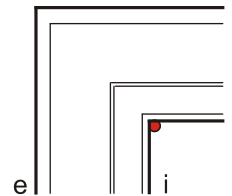
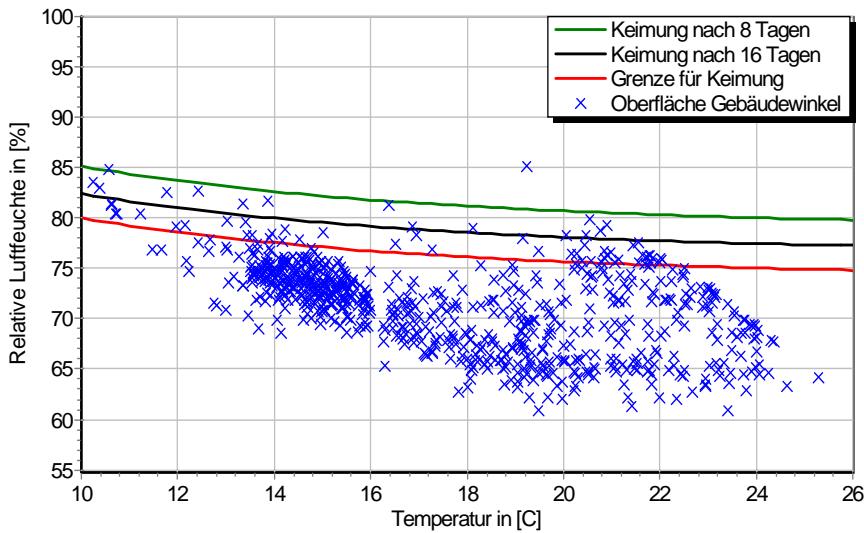


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

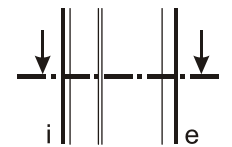
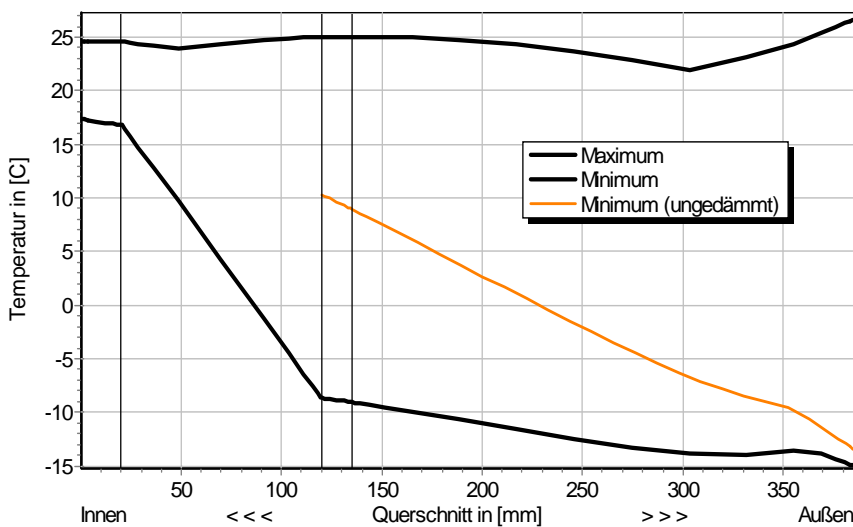


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche.
 Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

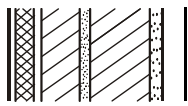


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel.
 Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

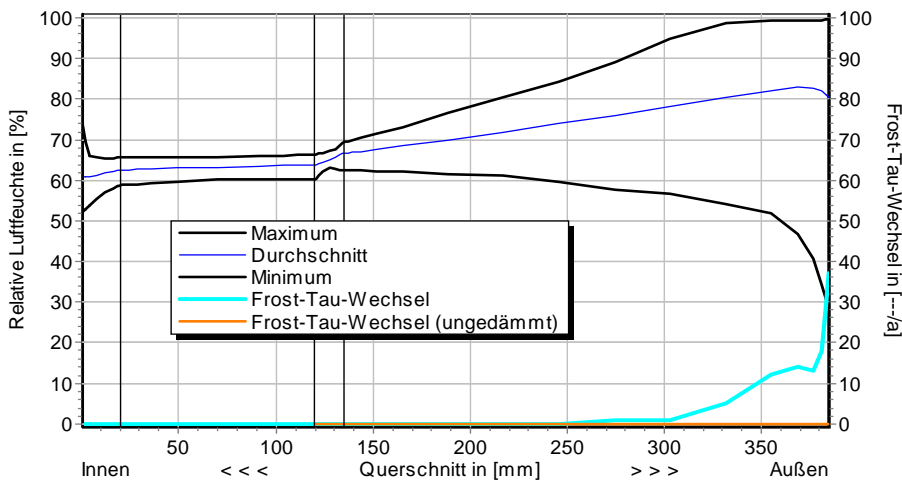
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



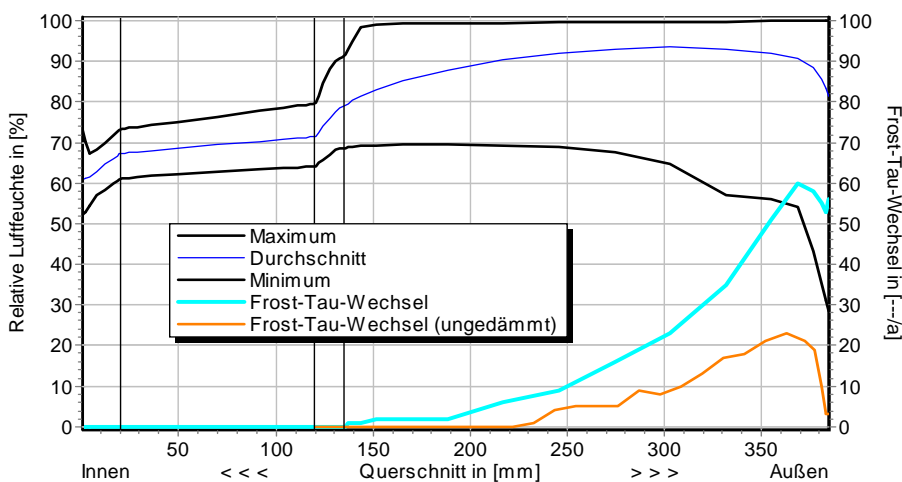
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

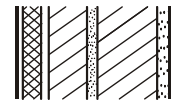


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	26	34	37
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	94,5	93,9	93,8
	WL_w	%	100	105,7	115,1	118,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	92,9	93,2	93,0
	CIL_{φ}	%	100	90,6	87,8	86,6
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	52	59	62
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	95,6	95,1	94,9
	WL_w	%	100	117,1	122,2	124,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	92,9	91,9	91,8
	CIL_{φ}	%	100	98,0	96,4	95,8

10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

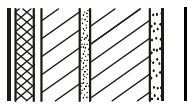
8 Schlussfolgerungen

- DIN:** Der Mindestwärmeschutz wird ab 80 mm Dämmung erfüllt, der Grenzwert für Kondensat wird immer eingehalten, das entstandene Kondensat trocknet vollständig aus.
- COND:** Der Mindestwärmeschutz wird ab 80 mm Dämmung erfüllt, der Grenzwert für Kondensat wird immer eingehalten, das entstandene Kondensat trocknet vollständig aus.
- Simulation:** Der Mindestwärmeschutz ist ab 80 mm gegeben. Auch mit Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung bei jeder Konstruktionsvariante eingehalten. Schimmelpilzwachstum ist ab 80 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

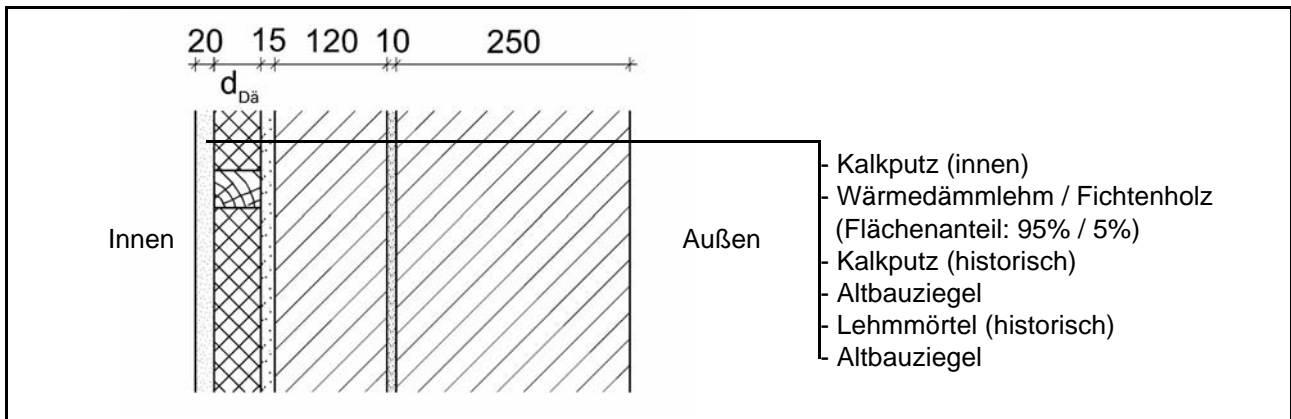
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.1
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.1



10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 50, 80$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Wärmedämmlehm (MW)	460	0,080	19,8	2,8	58,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

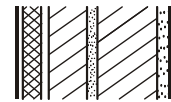
	Symbol	Einheit	Unsanirt	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,49	1,13	1,50	1,75
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,51	0,77	0,60	0,52
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,205	0,192	0,178
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,740	0,491	0,433
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,743	0,708	0,774	0,795

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_{e} = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,49	1,13	1,50	1,75
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,51	0,77	0,60	0,52
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,140	0,116	0,094
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,740	0,491	0,433
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	72,5	60,3	57,8	56,8
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,75	2,67	3,05
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,64	1,01	1,25
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	29,2	19,8	19,8

10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



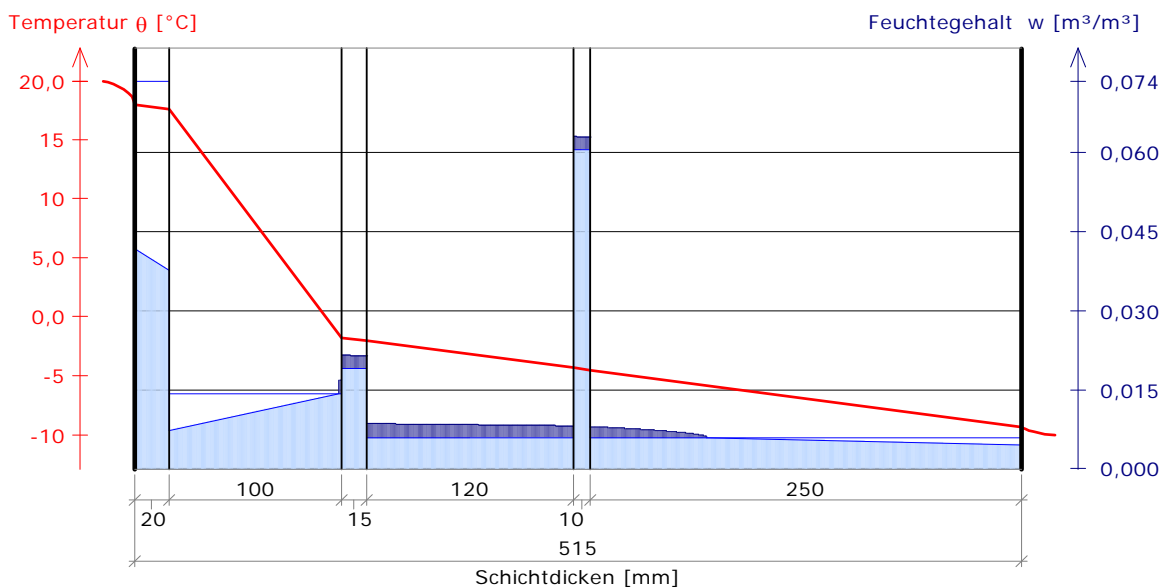
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

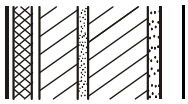
	Bedingung	Unsaniiert		50 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,0	2063	1169	0,042		
				0,038		
2 Wärmedämmlehm MW (Kork)	17,6	2010	1029	0,007		
				0,017	0,3	0,00
3 Kalkputz (historisch)	-1,8	529	529	0,021	15,0	0,04
				0,021		
4 Altbauziegel	-2,0	517	517	0,009	120,0	0,29
				0,008		
5 Lehmörtel (hist.)	-4,3	425	425	0,063	10,0	0,02
				0,063		
6 Altbauziegel	-4,6	418	418	0,008	67,5	0,09
				0,004		
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	275	208			
	-10	260	208			





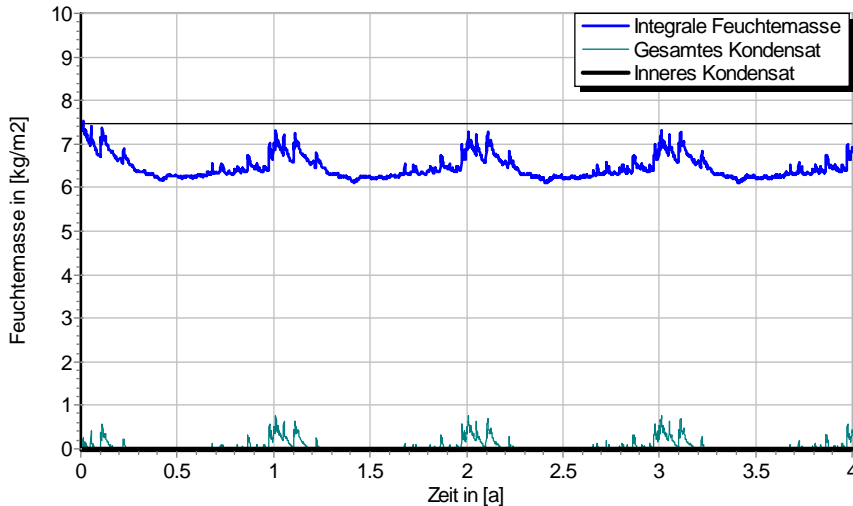
10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



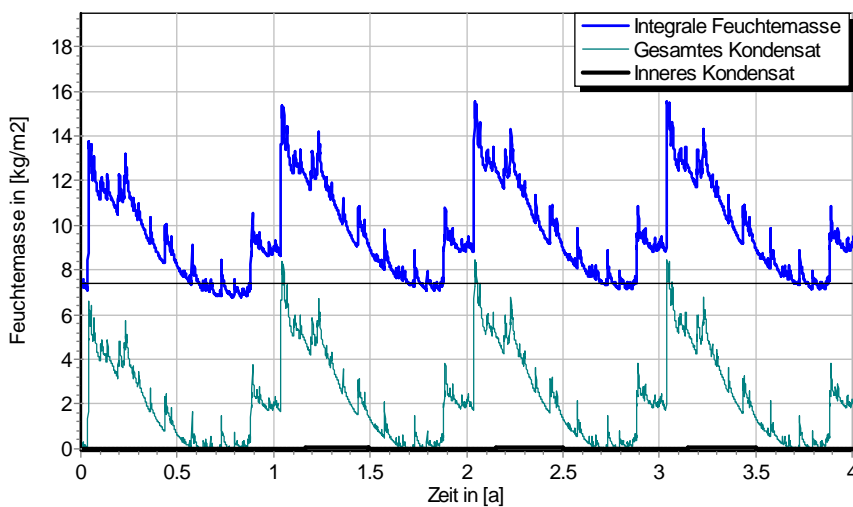
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,35	-0,296	-0,192	-0,154
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

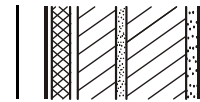


$\Delta m_{W,80}$

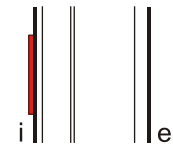
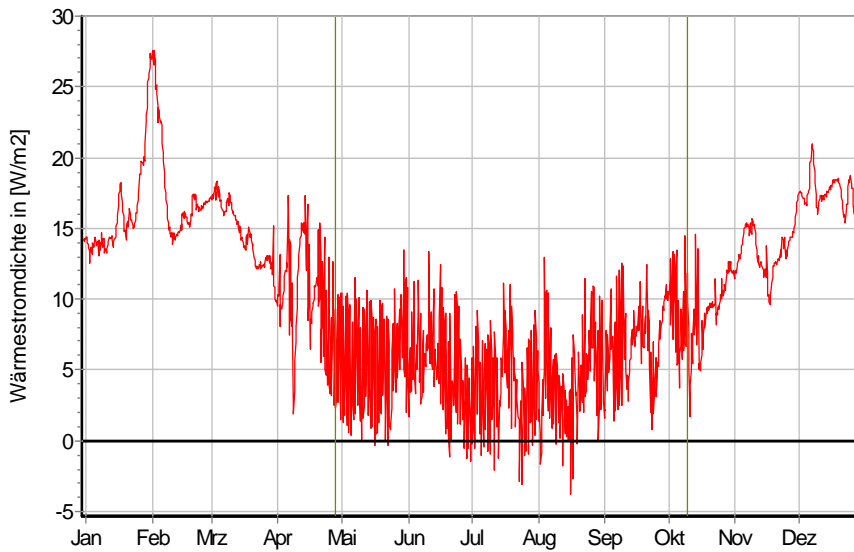
Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,927	7,427	7,863	8,098
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,006	0,023	0,064

10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



5.2 Instationäre Wärmeverluste

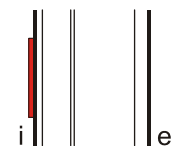
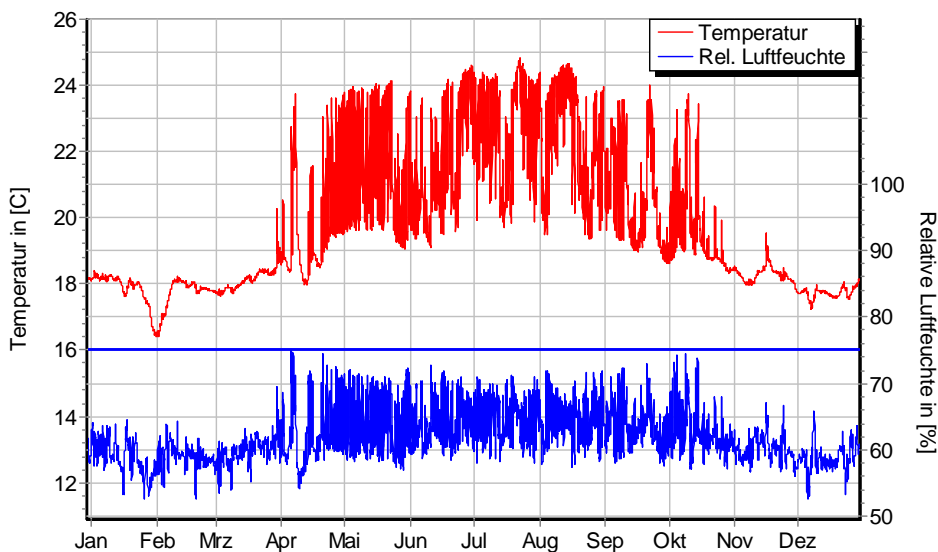


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 50$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

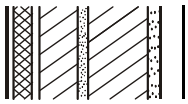
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,42	14,21	11,08	9,67
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,23	0,81	0,63	0,55
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,64	1,07	1,42	1,65

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,08	14,08	11,01	9,63
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,22	0,80	0,63	0,55
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,65	1,08	1,43	1,66

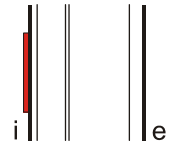
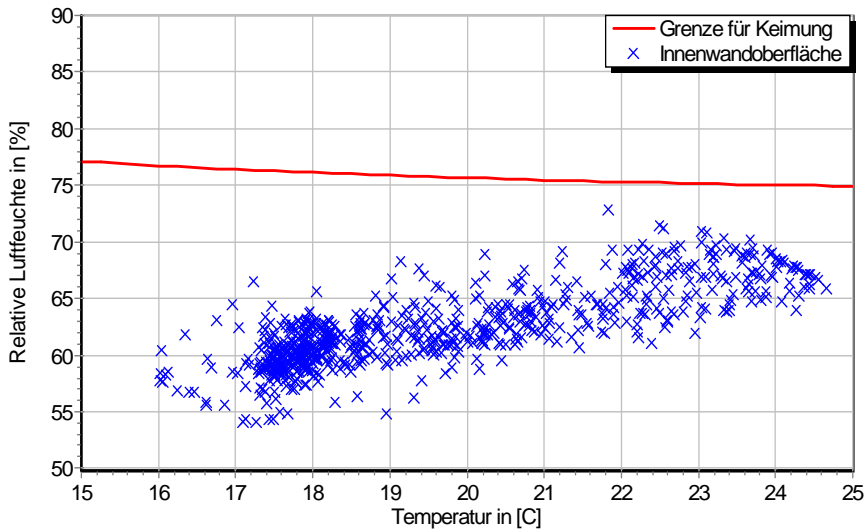
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



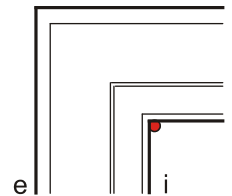
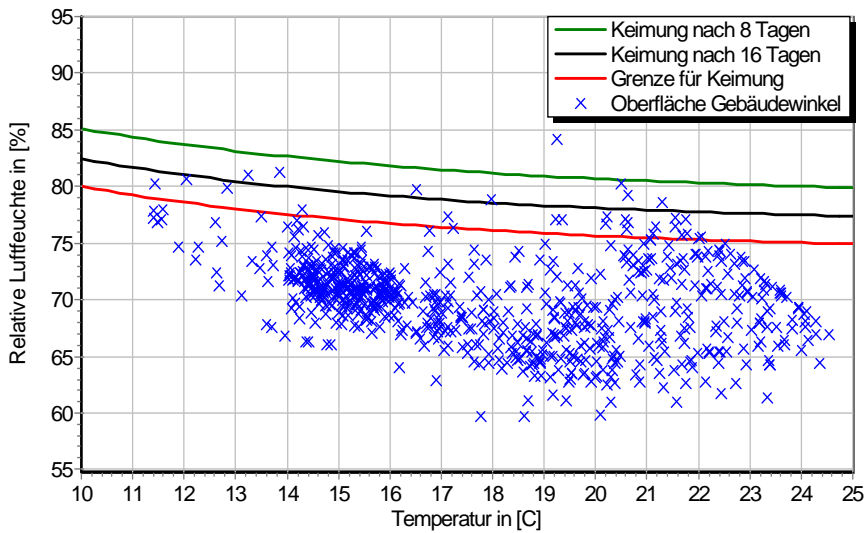
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 50$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

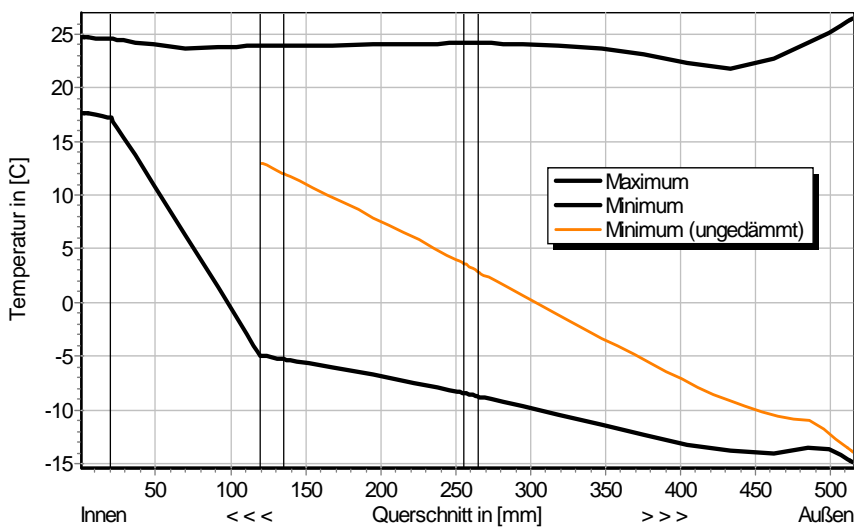


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



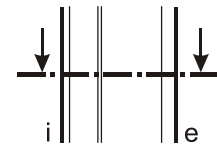
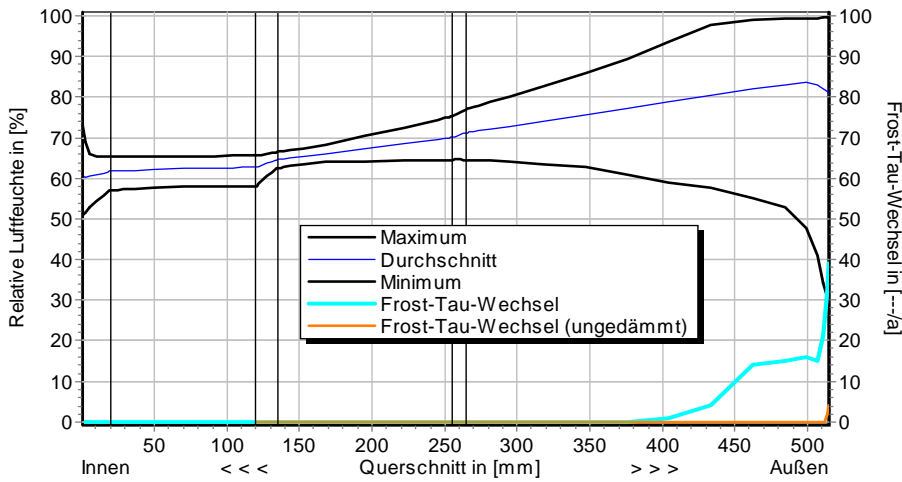
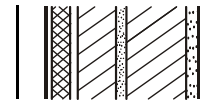
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

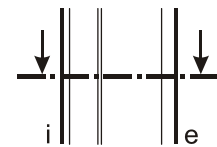
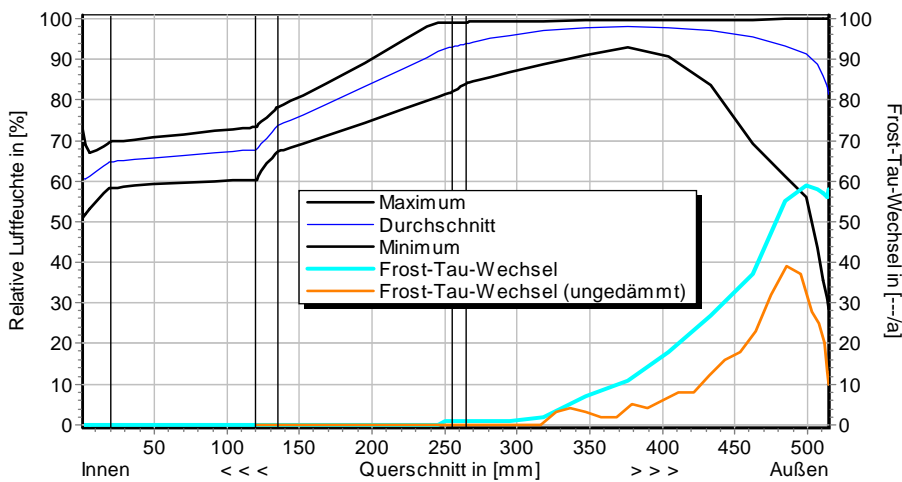


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



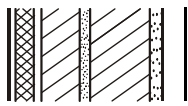
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	10	31	36	39
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	95,3	95,9	94,7
	WL_w	%	100	116,0	122,5	125,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	95,9	95,8	96,0
	CIL_{φ}	%	100	90,5	88,6	87,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	39	56	61	64
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	97,0	96,5	96,3
	WL_w	%	100	114,7	118,7	120,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	95,4	95,3	94,5
	CIL_{φ}	%	100	97,8	96,8	97,5



10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

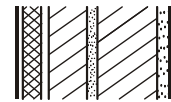
- DIN: Der Mindestwärmeschutz wird ab 80 mm Dämmung erfüllt, der Grenzwert für Kondensat wird immer eingehalten, das entstandene Kondensat trocknet vollständig aus.
- COND: Der Mindestwärmeschutz wird ab 80 mm Dämmung erfüllt, der Grenzwert für Kondensat wird immer eingehalten, das entstandene Kondensat trocknet vollständig aus.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 80 mm gegeben. Auch mit Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und die Verdunstung bei jeder Konstruktionsvariante eingehalten. Schimmelpilzwachstum ist ab 80 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

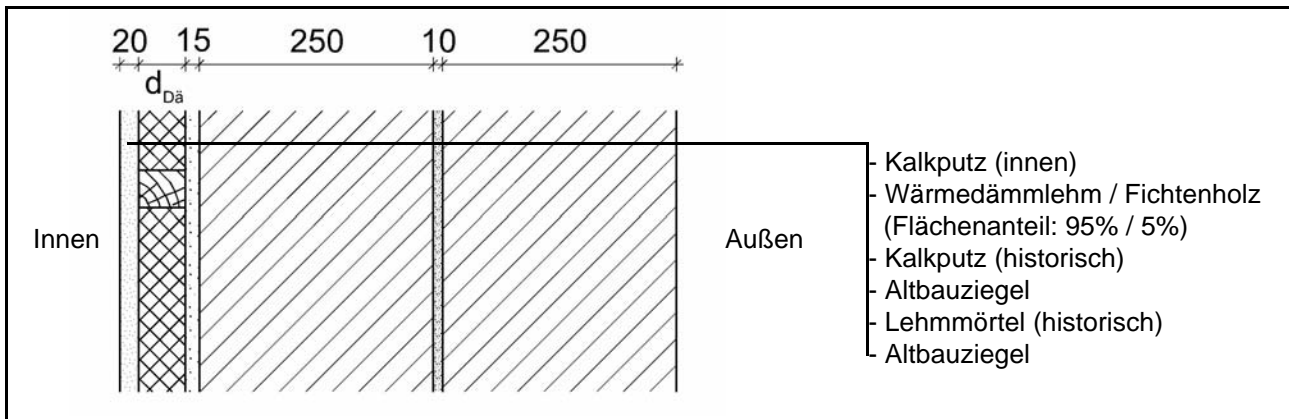
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatte, außen unverputzt: 4.2
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.2

10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 50, 80 und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Wärmedämmlehm (MW)	460	0,080	19,8	2,8	58,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232

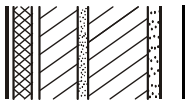
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,66	1,30	1,66	1,91
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,21	0,68	0,55	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,142	0,157	0,149
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,740	0,583	0,391
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,799	0,732	0,770	0,788

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	50 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,66	1,30	1,66	1,91
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,21	0,68	0,55	0,48
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,064	0,069	0,054
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,740	0,583	0,391
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	59,1	57,1	56,2
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,75	2,67	3,05
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,64	1,01	1,25
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	29,2	19,8	19,8



10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

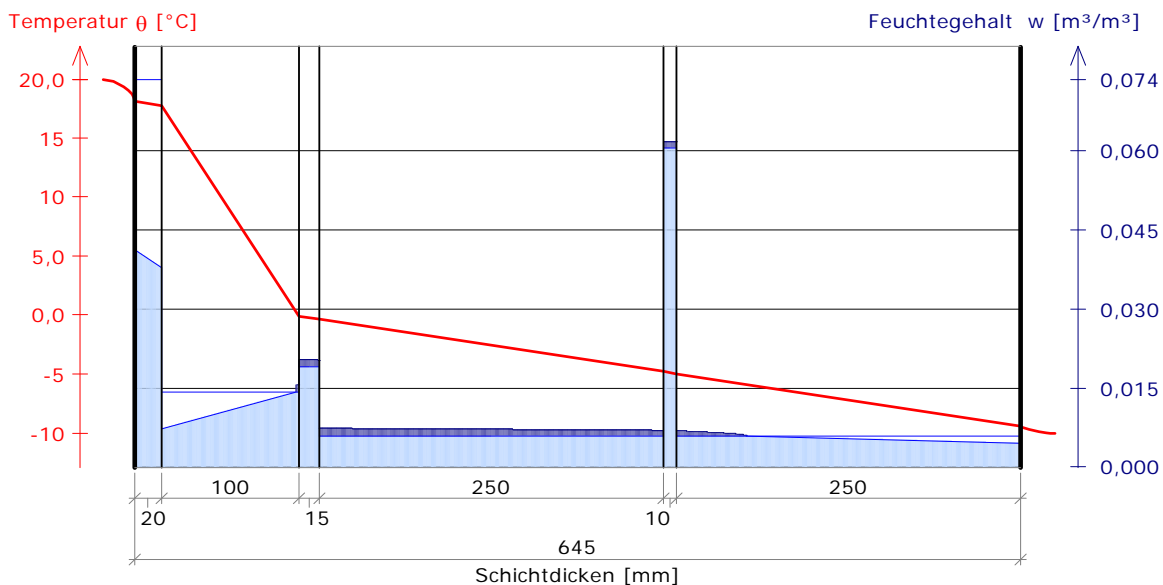
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		50 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

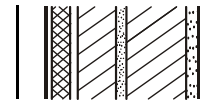
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,1	2083	1169	0,041		
				0,038		
2 Wärmedämmlehm MW (Kork)	17,8	2034	1047	0,007		
				0,016	0,2	0,00
3 Kalkputz (historisch)	-0,1	608	608	0,020	15,0	0,02
				0,020		
4 Altbauziegel	-0,3	595	595	0,007	250,0	0,30
				0,007		
5 Lehmörtel (hist.)	-4,8	410	410	0,062	10,0	0,01
				0,062		
6 Altbauziegel	-5,0	403	403	0,007	50,9	0,03
				0,005		
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	273	208			
	-10	260	208			



10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

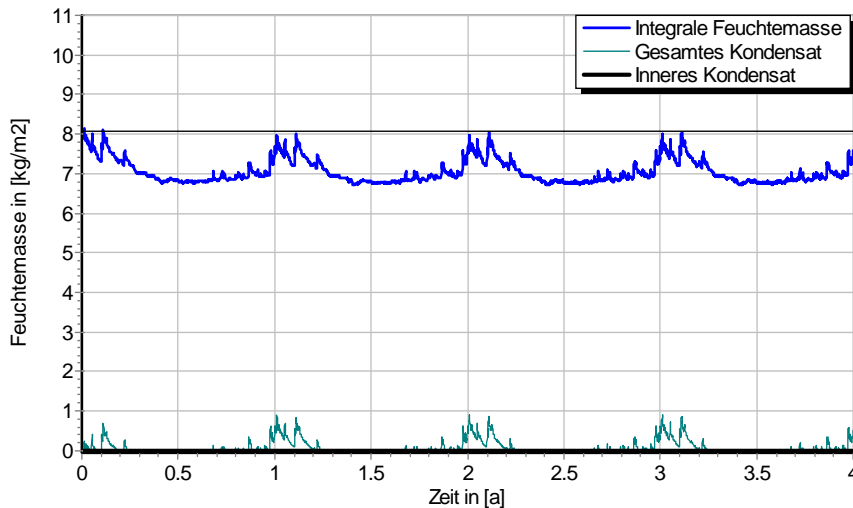


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



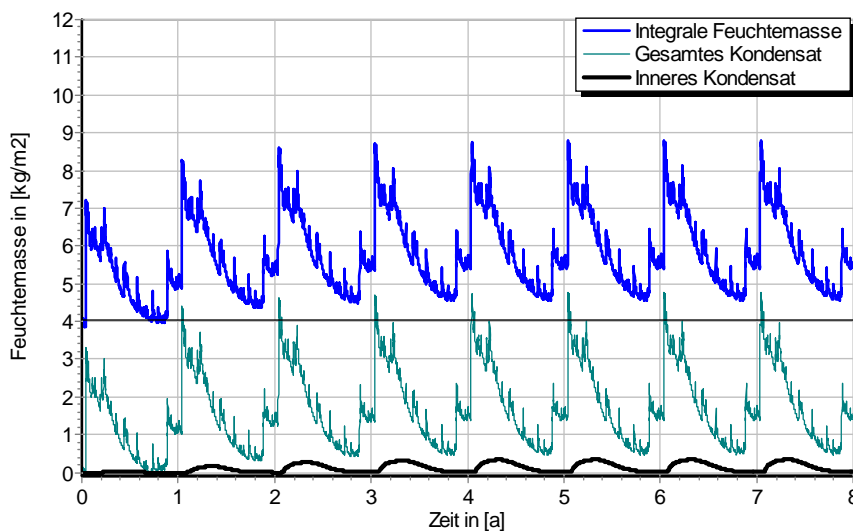
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



+ $\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
 ohne Schlagregen

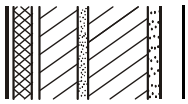
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,434	-0,197	-0,094	-0,053
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



$\Delta m_{W,80}$

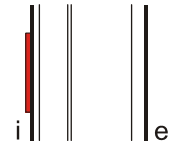
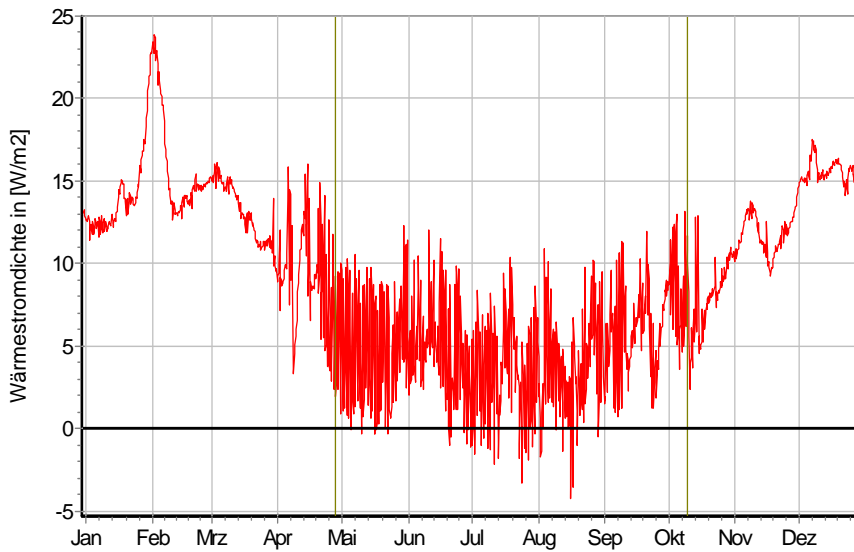
Wassermassen
 für $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,446	8,436	9,122	9,485
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,183	0,484	0,695



10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

5.2 Instationäre Wärmeverluste

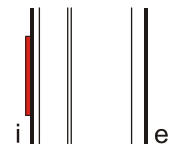
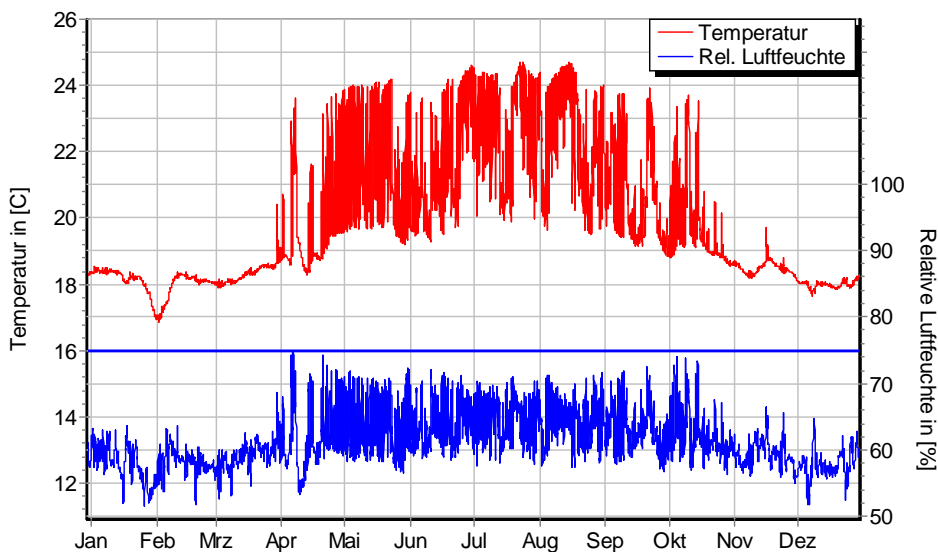


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 50$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	22,02	12,61	10,08	8,90
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,03	0,72	0,57	0,51
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,80	1,22	1,57	1,81

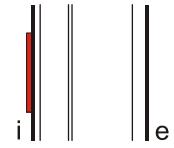
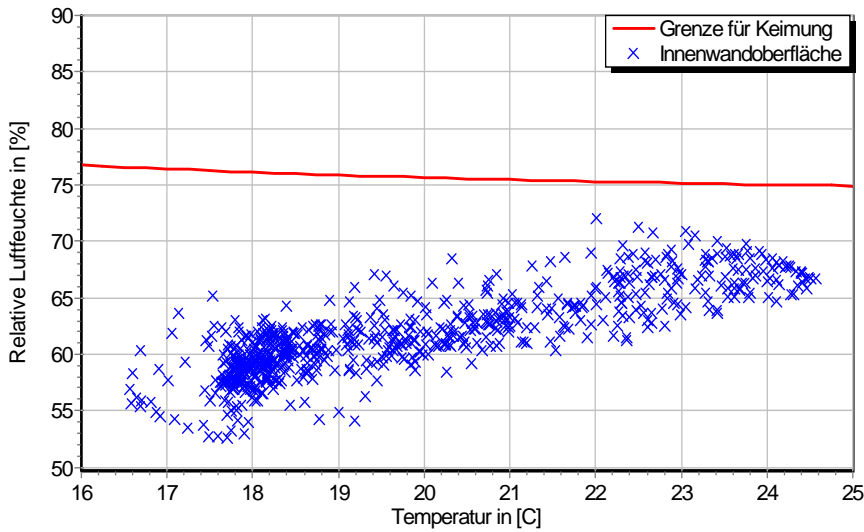
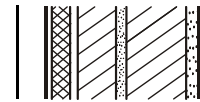
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	50 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,73	12,51	10,03	8,87
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,02	0,71	0,57	0,50
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,81	1,24	1,58	1,81

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

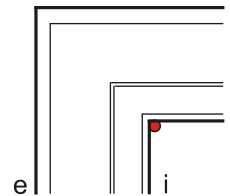
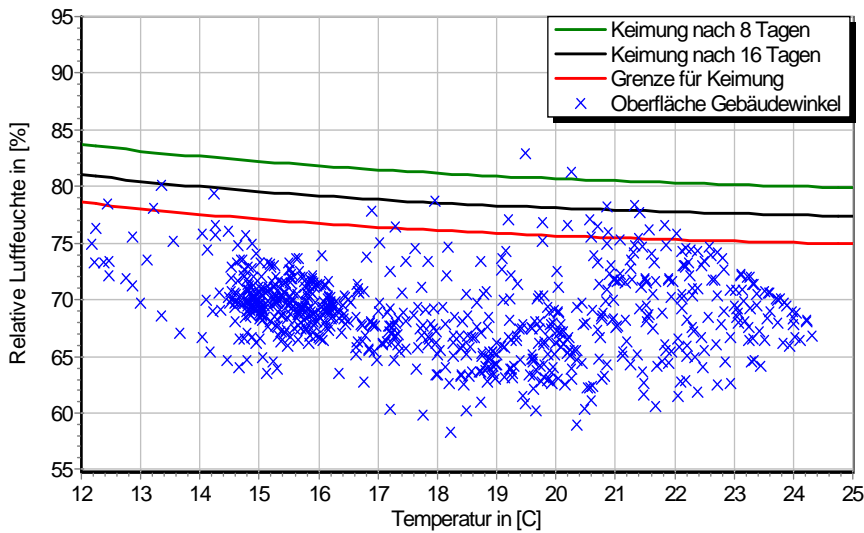


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 50$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

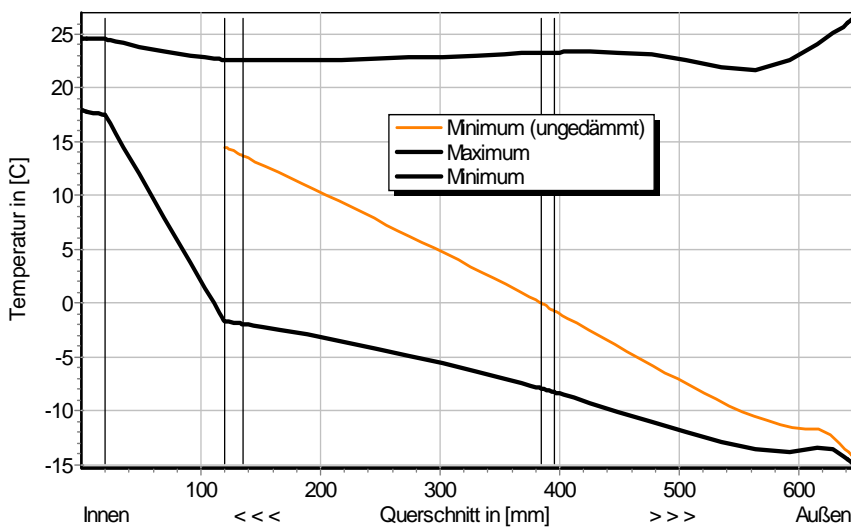


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

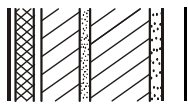


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen.

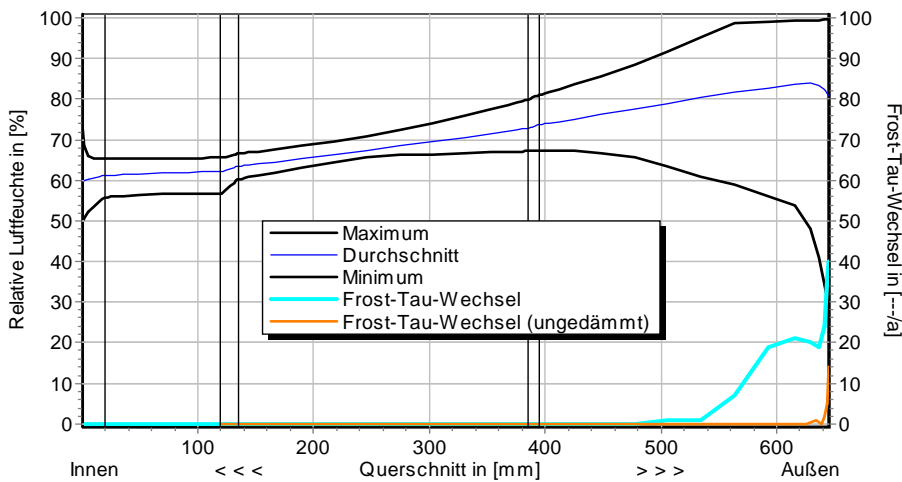
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



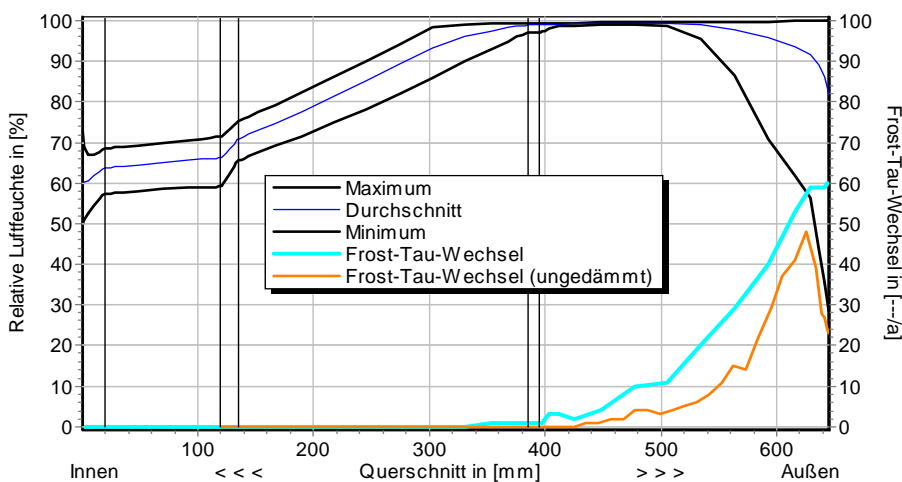
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

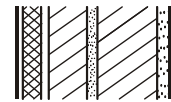


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	34	38	41
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,1	95,7	95,6
	WL_w	%	100	114,5	119,4	122,3
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,0	96,4	96,8
	CIL_φ	%	100	90,5	88,8	88,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	60	64	65
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,5	97,2	97,1
	WL_w	%	100	110,8	114,2	115,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,1	96,8	96,8
	CIL_φ	%	100	97,2	96,2	95,8

10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	○	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	50 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle gedämmten Konstruktionen erfüllen die DIN-Kriterien.

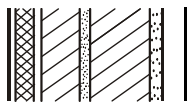
COND: Alle gedämmten Konstruktionen erfüllen die DIN-Kriterien.

Simulation: Auch bei Wandaufbauten mit hoher eindringender Schlagregenmenge werden alle Grenzwerte eingehalten. Schimmelpilzwachstum ist bei allen gedämmten Varianten nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

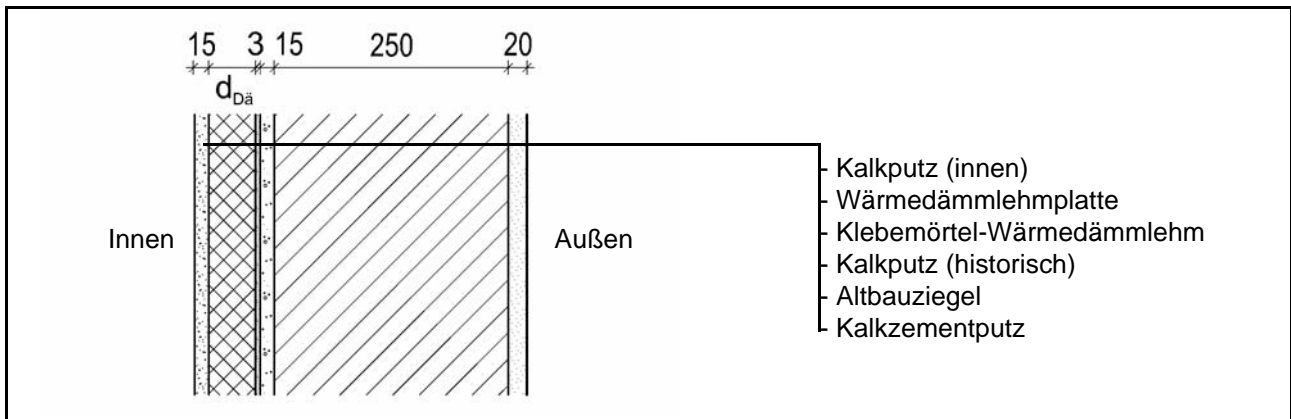
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmputz, außen unverputzt: 11.3



10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 80$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Wärmedämmlehmplatte-40mm	350	0,08	26	0,5	42,2	0,003
Wärmedämmlehmplatte-80/100mm	350	0,08	28	0,6	41,8	0,015
Klebemörtel-Wärmedämmlehm	560	0,18	12,6	2,0	78	0,042
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

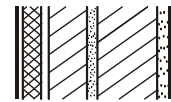
	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	0,89	1,39	1,64
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,94	0,64	0,55
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,217	0,152	0,133
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,725	0,486	0,439
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,682	0,760	0,784

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	0,89	1,39	1,64
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,94	0,64	0,55
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,019	0,079	0,062
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,725	0,486	0,439
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	63,0	58,4	57,2
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,24	2,44	3,00
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,54	1,04	1,29
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,5	16,3	15,4

10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



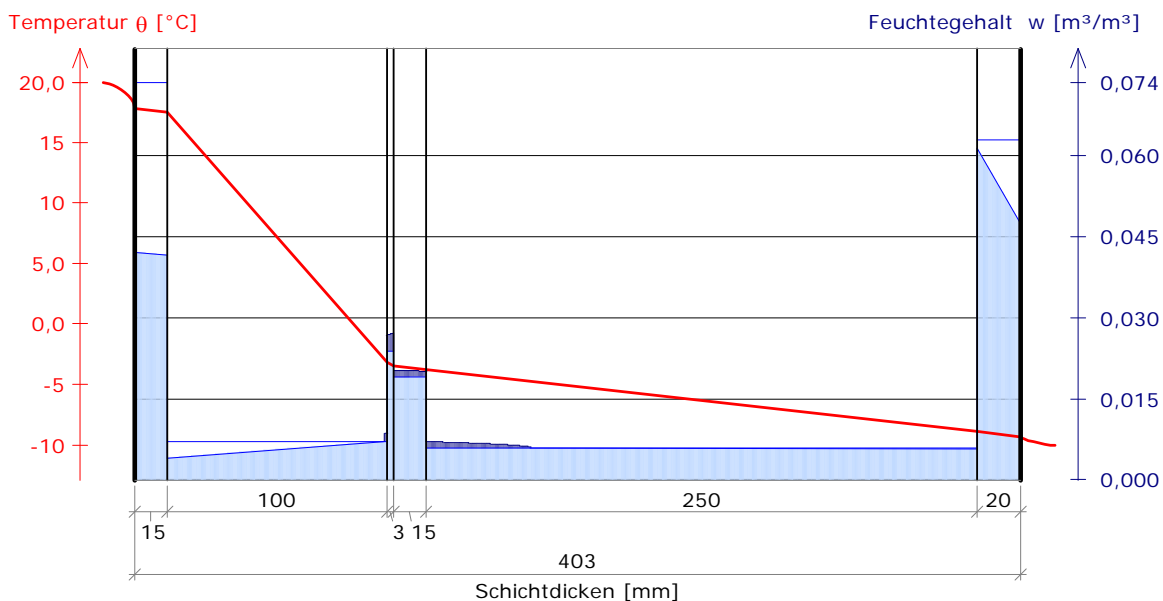
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

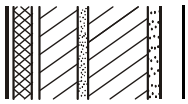
	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,8	2045	1169	0,042		
				0,042		
2 Wärmedämmlehmplatte	17,5	2002	1130	0,004		
				0,009	0,0	0,00
3 Klebemörtel (Wärmedämmlehmplatte)	-3,2	469	469	0,027	3,0	0,01
				0,027		
4 Kalkputz (historisch)	-3,5	459	459	0,020	15,0	0,02
				0,020		
5 Altbauziegel	-3,7	447	447	0,007	47,5	0,04
				0,006		
6 Kalkzementputz	-8,9	286	279	0,061		
				0,047		
Luftschicht (Außenseite)	-9,3	276	208			
	-10	260	208			





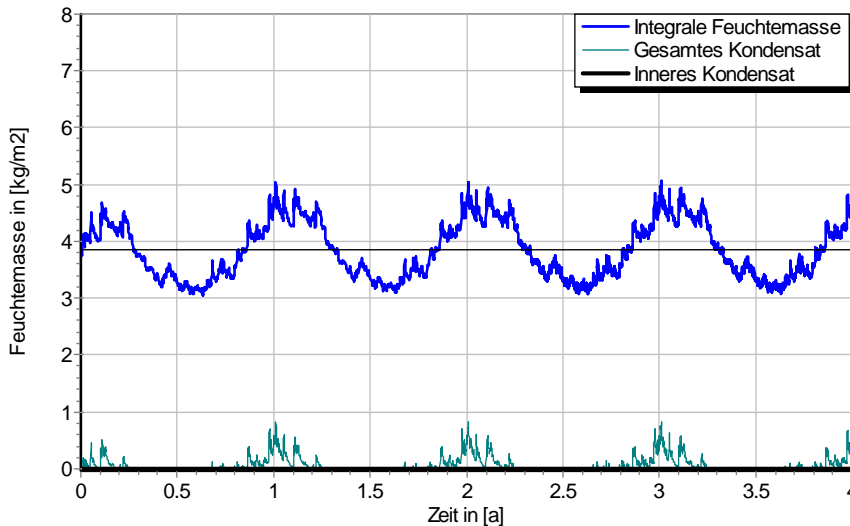
10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



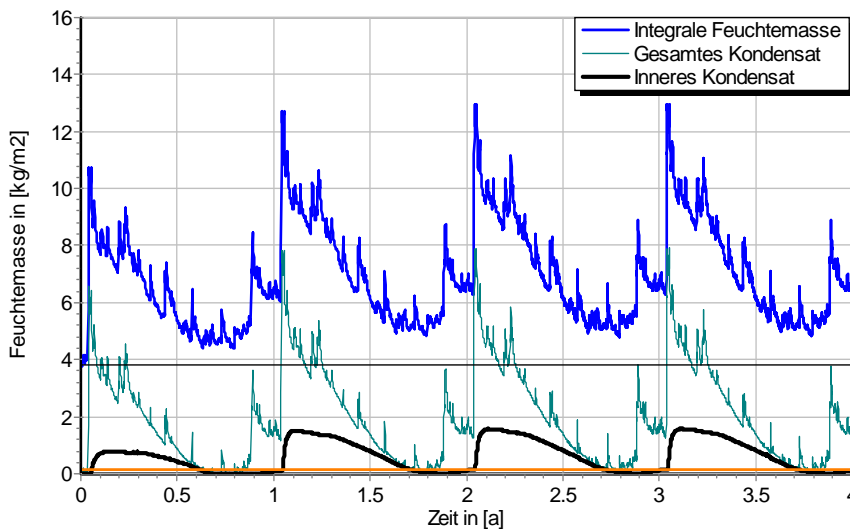
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	0,957	1,145	1,216
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



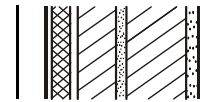
$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

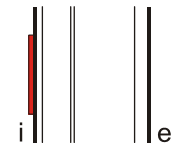
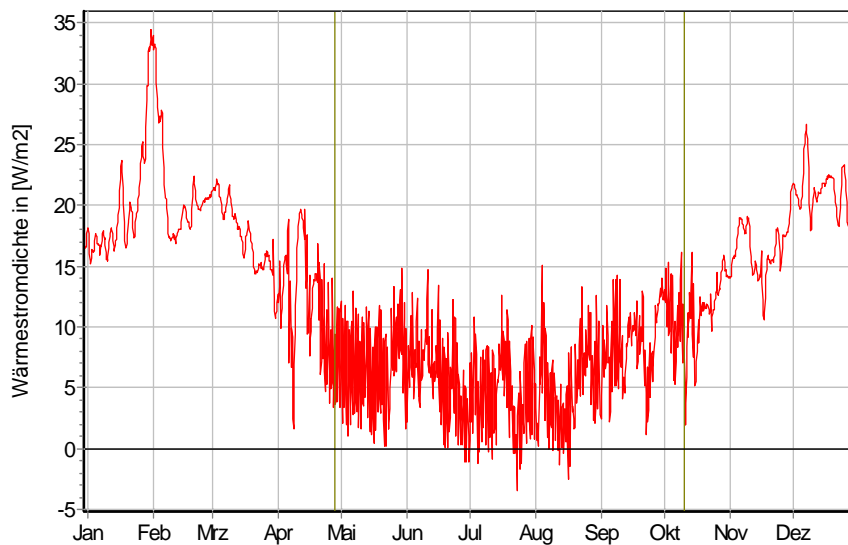
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	7,892	8,693	9,114
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	0,865*	1,272*	1,435*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge

10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

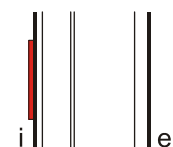
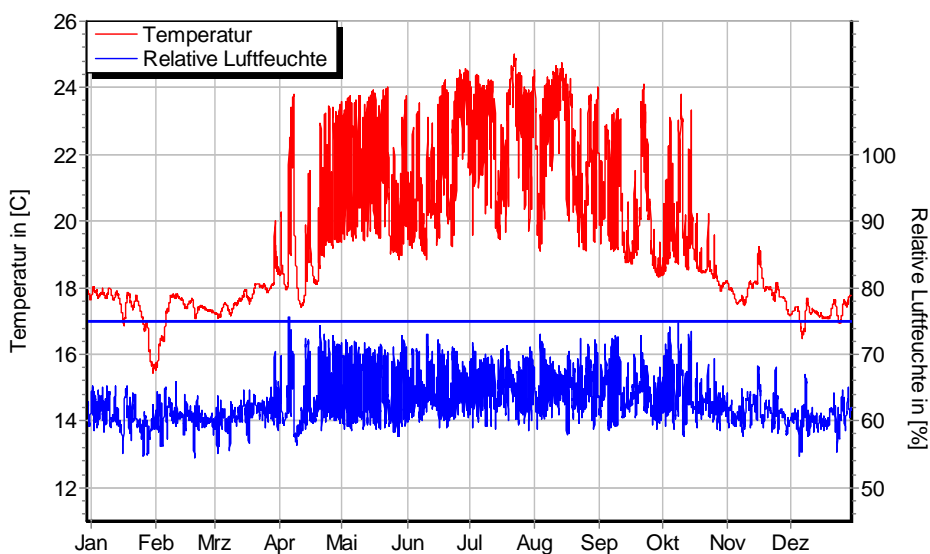


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

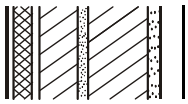
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,9	17,21	11,59	9,96
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,48	0,98	0,66	0,57
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,50	0,85	1,35	1,60

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	17,05	11,66	10,11
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,47	0,97	0,66	0,57
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,51	0,86	1,34	1,57

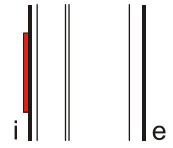
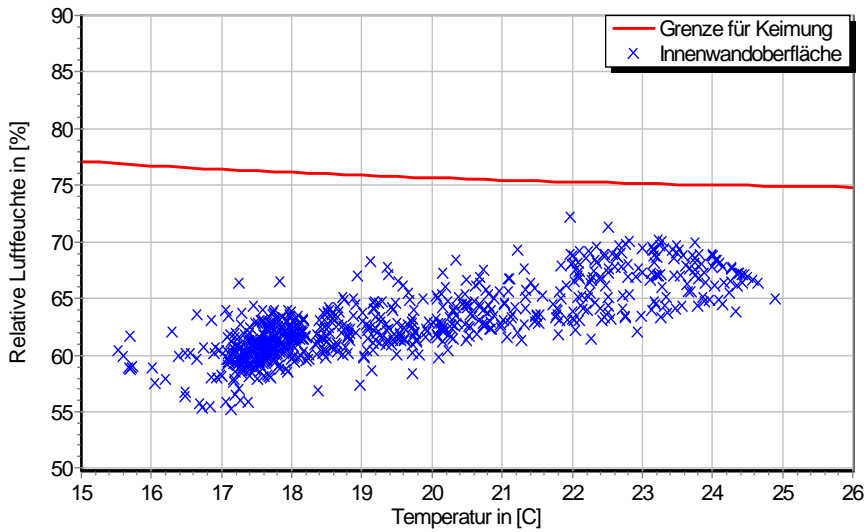
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



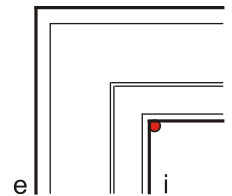
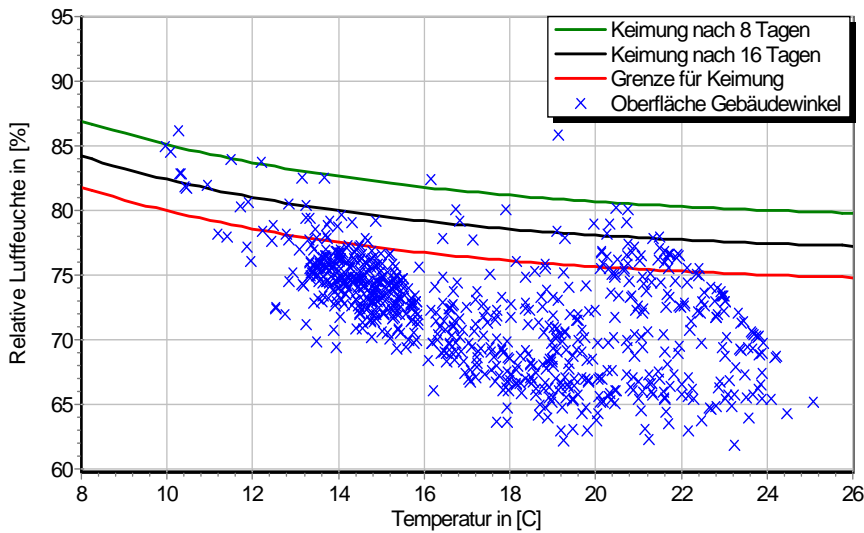
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

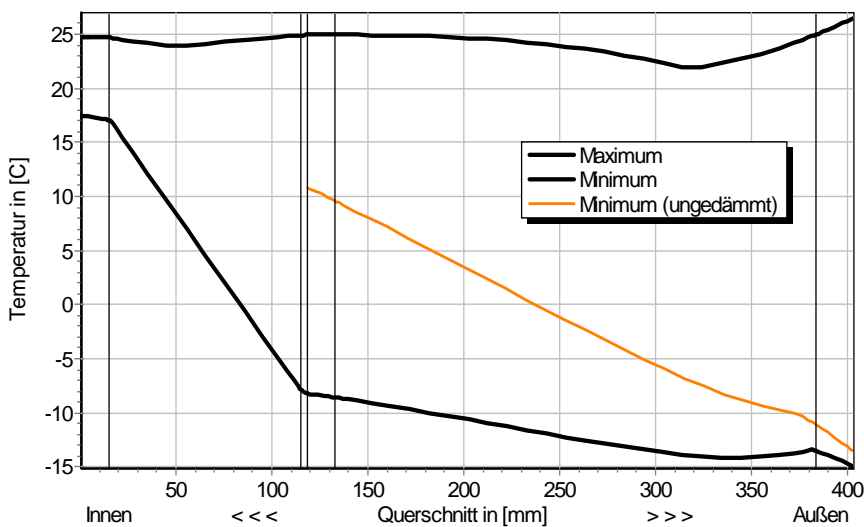


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



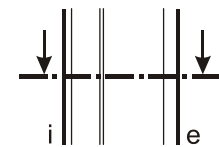
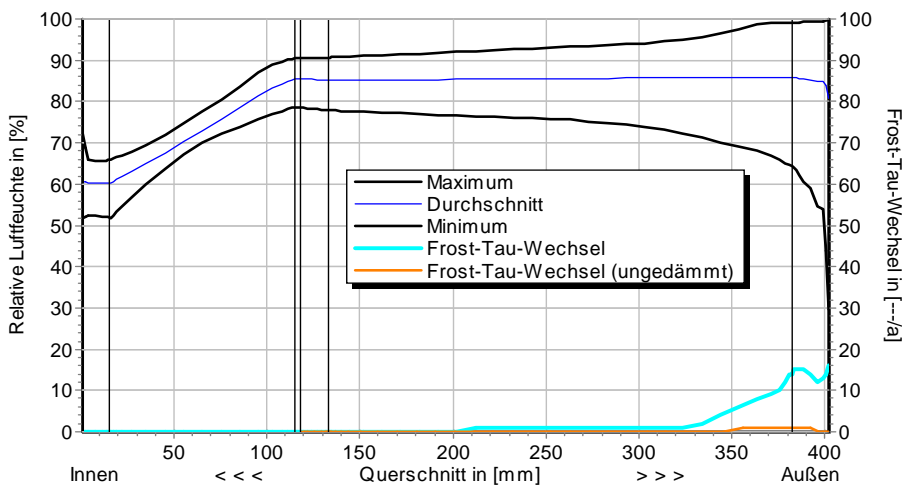
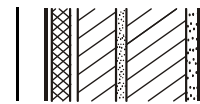
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

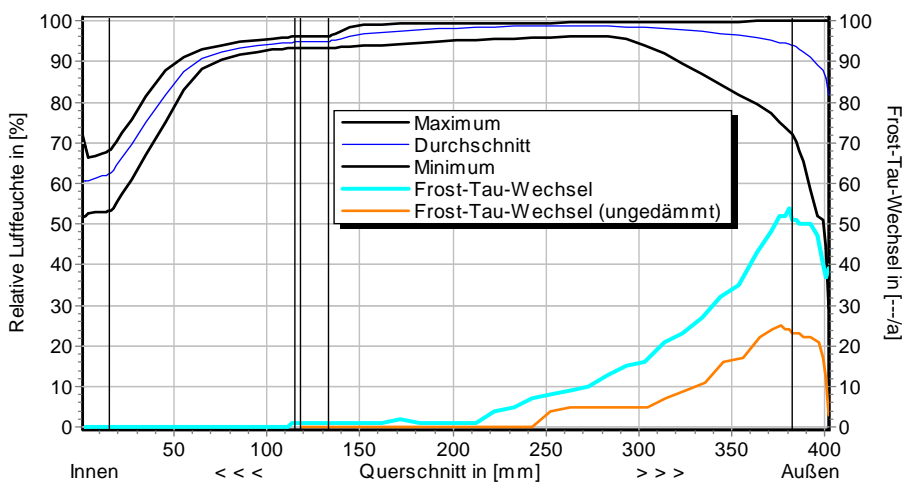


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



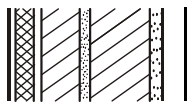
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)		Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	14	21	25	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,2	96,4	96,1	
	WL_w	%	100	91,7	84,6	83,1	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	103,6	103,1	103,1	
	CIL_φ	%	100	97,6	95,2	94,3	
Schlagregenexponiert (West)		Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	43	52	54	
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	97,8	97,0	96,8	
	WL_w	%	100	106,0	108,4	109,1	
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,6	96,3	96,0	
	CIL_φ	%	100	109,2	109,0	108,8	



10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Ab einer Dämmdicke von 80 mm erfüllen die Konstruktion alle DIN-Kriterien. Mit 40 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.

COND: Ab einer Dämmdicke von 80 mm erfüllen die Konstruktion alle DIN-Kriterien. Mit 40 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.

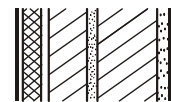
Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllen die Konstruktionen ab 80 mm Dämmung alle Kriterien. Mit 40 mm ist grundsätzlich der Mindestwärmeschutz nicht gegeben, ferner konnten mit Schlagregeneinwirkung ab 80 mm Dämmung zu hohe Kondensatmengen festgestellt werden bzw. ist mit 100 mm die Verdunstung des Kondensats nicht mehr gegeben.
Im Gebäudewinkel ist mit 40 mm Dämmung Schimmelpilzwachstum zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 und 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

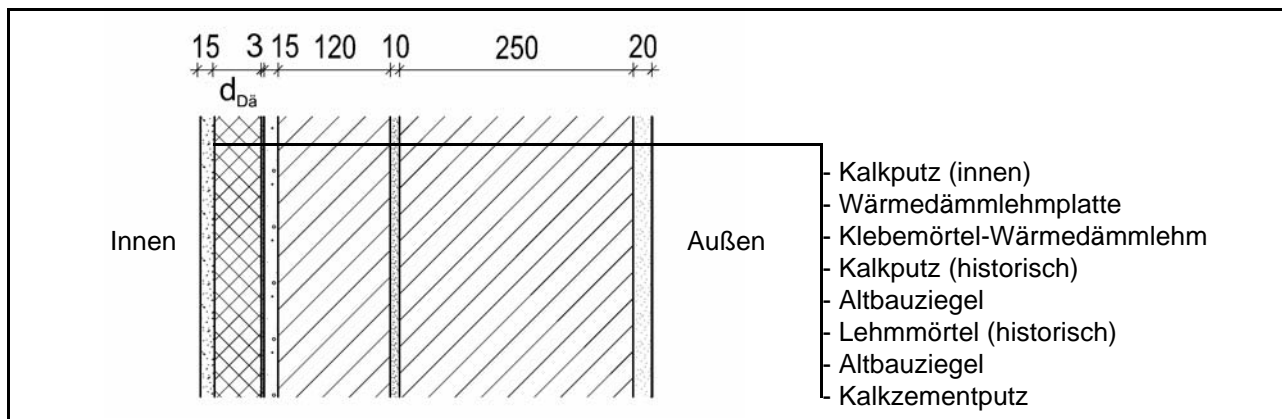
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 40, 80 und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Wärmedämmlehmplatte-40mm	350	0,08	26	0,5	42,2	0,003
Wärmedämmlehmplatte-80/100mm	350	0,08	28	0,6	41,8	0,015
Klebemörtel-Wärmedämmlehm	560	0,18	12,6	2,0	78	0,042
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,52	1,06	1,56	1,81
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,45	0,82	0,58	0,51
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,139	0,123	0,114
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,743	0,493	0,368
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,537	0,708	0,774	0,795

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

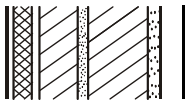
2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,52	1,06	1,55	1,80
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,45	0,82	0,58	0,51
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,042	0,028	0,019
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,743	0,493	0,368
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	71,5	61,0	57,6	56,5

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,24	2,44	3,00
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,54	1,04	1,29
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,5	16,3	15,4



10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

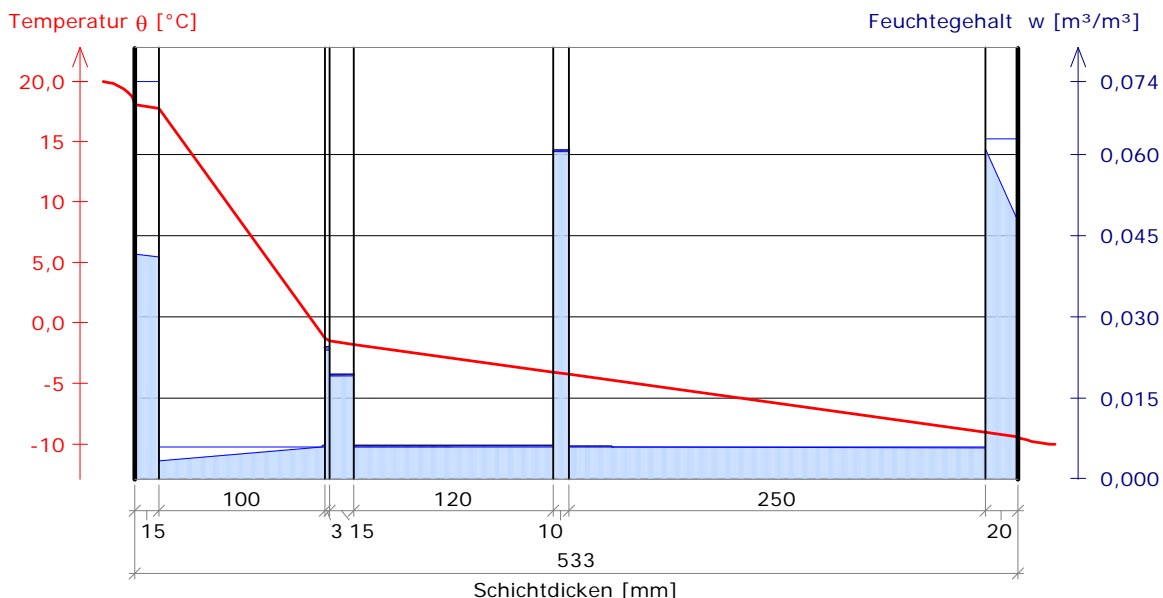
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

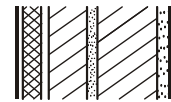
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,0	2068	1169	0,042		
				0,041		
2 Wärmedämmlehmplatte	17,7	2028	1135	0,004		
				0,007	0,0	0,00
3 Klebemörtel (Wärmedämmlehmplatte)	-1,3	551	551	0,024	3,0	0,00
				0,024		
4 Kalkputz (historisch)	-1,5	540	540	0,019	15,0	0,00
				0,019		
5 Altbauziegel	-1,8	528	528	0,006	120,0	0,01
				0,006		
6 Lehmörtel (historisch)	-4,1	436	436	0,061	10,0	0,00
				0,061		
7 Altbauziegel	-4,3	428	428	0,006	20,1	0,00
				0,006		
8 Kalkzementputz	-9,0	284	270	0,060		
				0,048		
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	274	208			
	-10	260	208			



10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

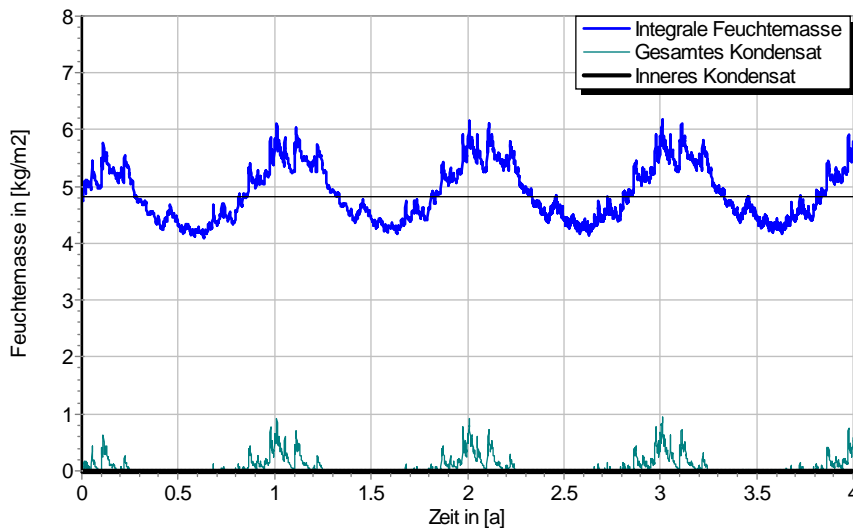


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



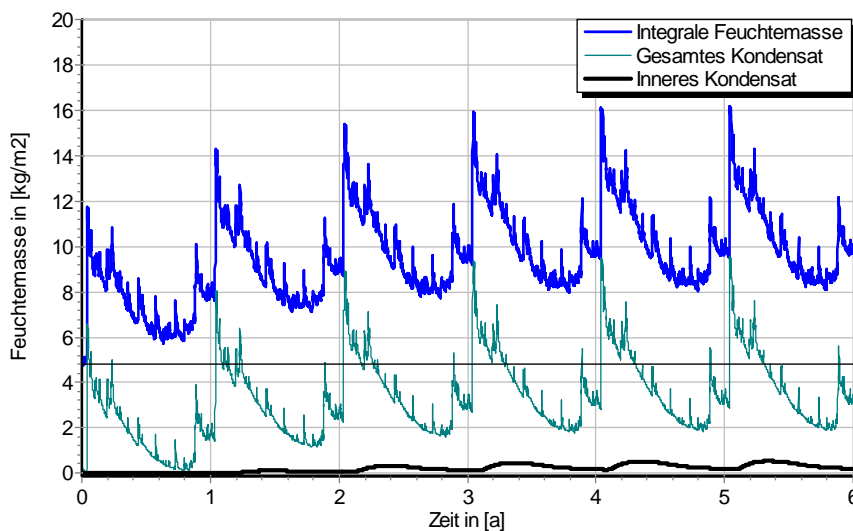
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

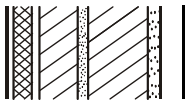
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,935	0,994	1,239	1,340
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



$\Delta m_{W,80}$

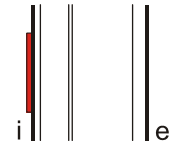
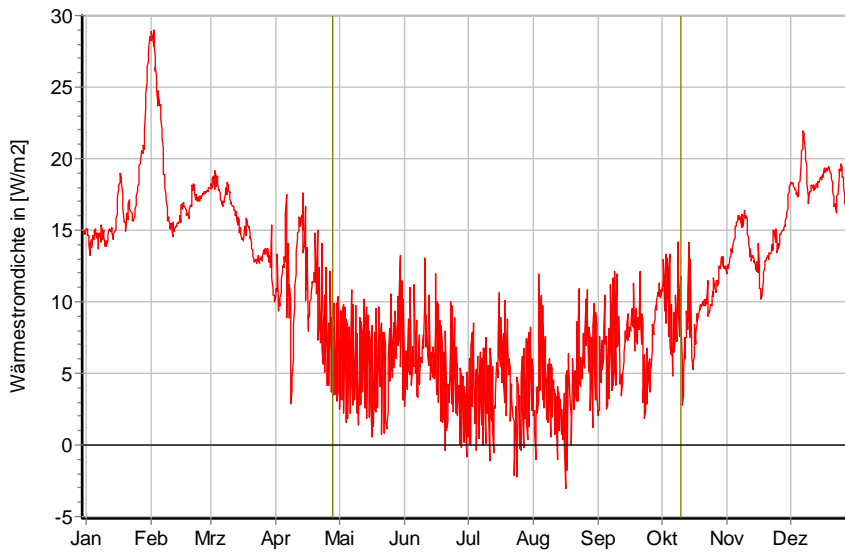
Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,372	9,073	10,773	11,378
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,045	0,391	0,558



10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

5.2 Instationäre Wärmeverluste

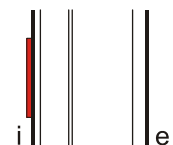
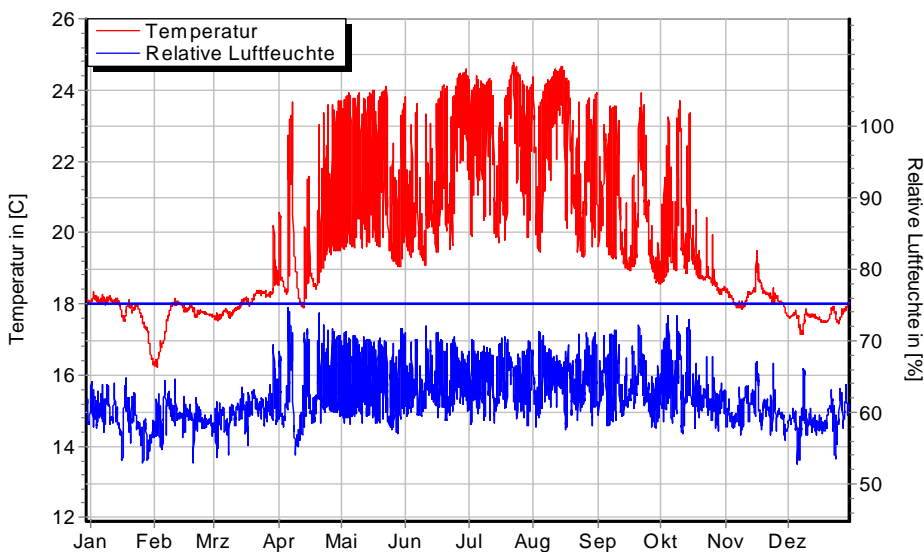


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,55	14,87	10,47	9,13
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,20	0,85	0,60	0,52
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,66	1,01	1,51	1,76

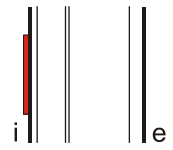
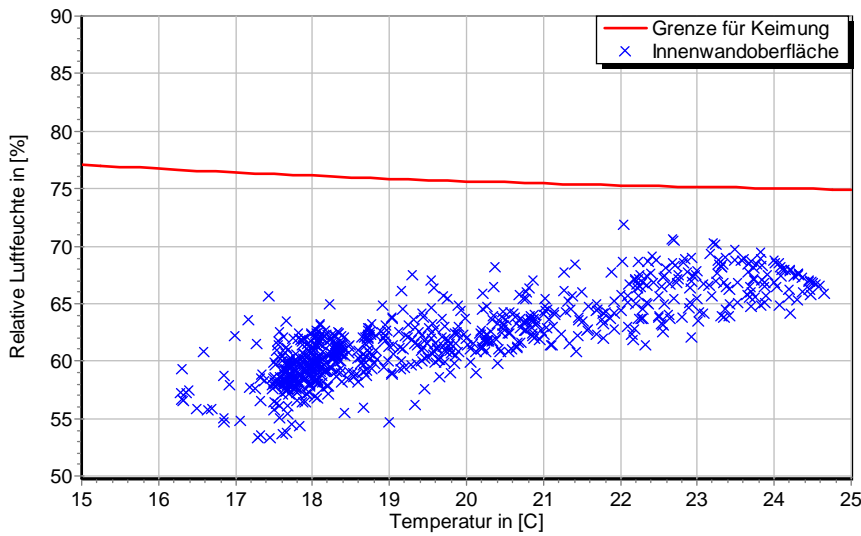
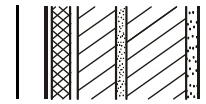
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	26,18	14,73	10,53	9,24
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,19	0,84	0,60	0,53
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,67	1,02	1,50	1,73

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

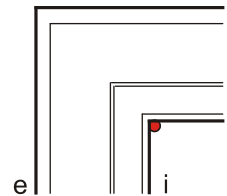
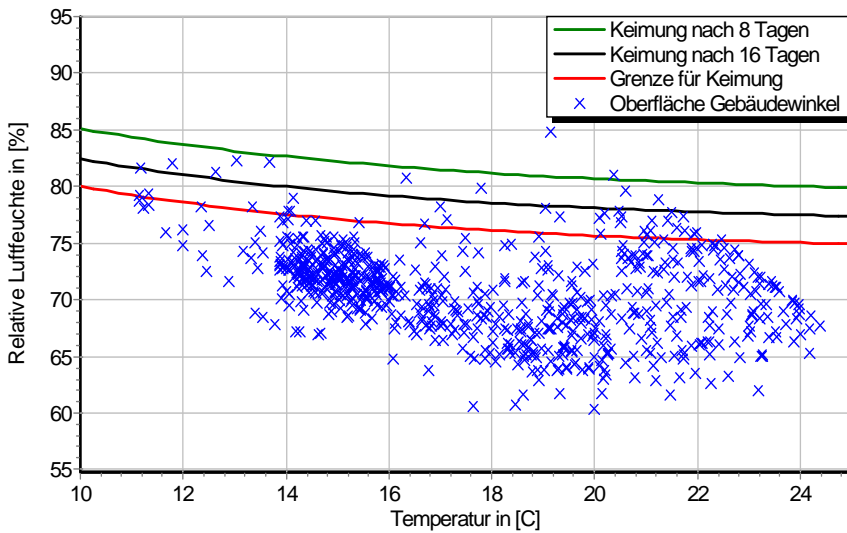


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

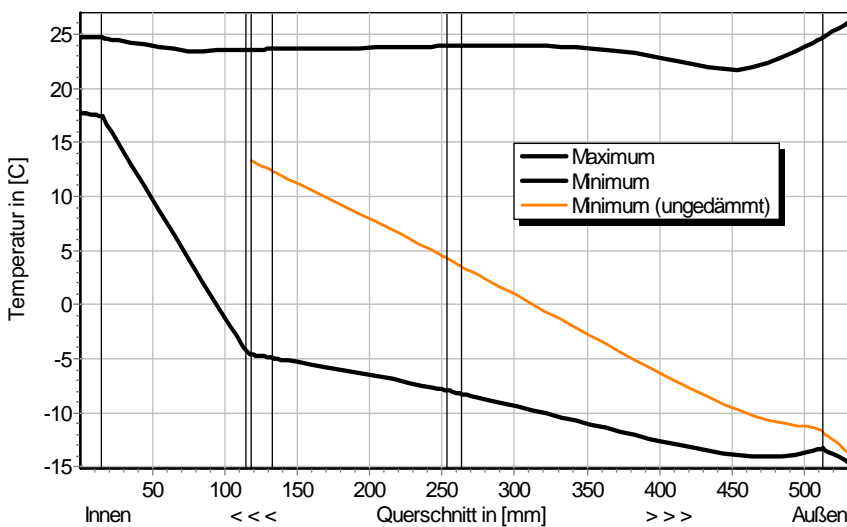


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

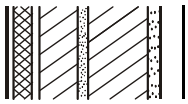


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

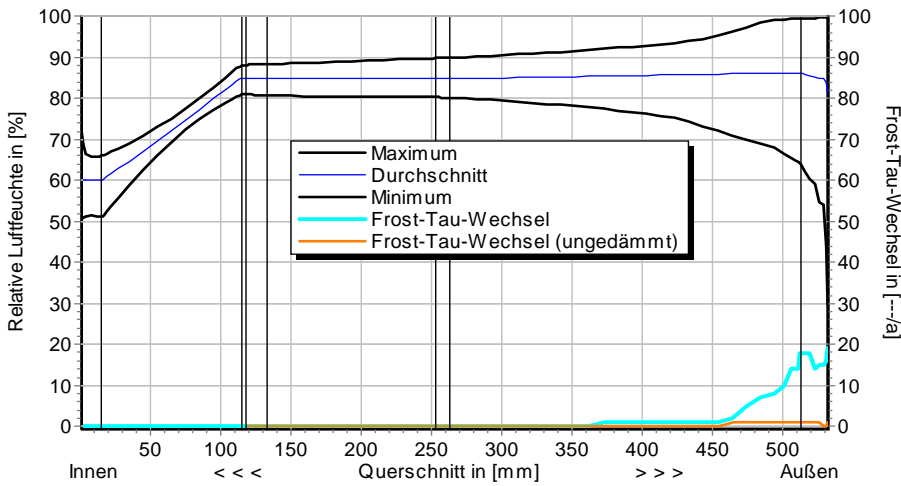
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



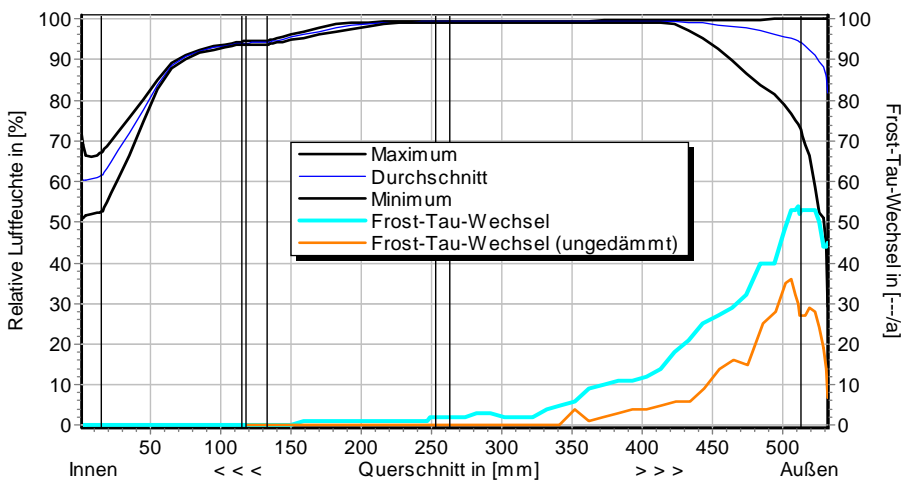
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

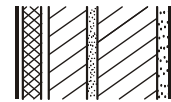


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	17	24	27
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,0	97,3	97,2
	WL_w	%	100	89,0	82,9	81,5
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	101,4	101,6	101,7
	CIL_φ	%	100	97,7	95,3	94,6
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	27	47	54	57
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	98,3	97,8	97,5
	WL_w	%	100	103,7	105,5	106,1
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	98,4	97,7	97,5
	CIL_φ	%	100	105,1	105,2	105,2

10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Ab einer Dämmdicke von 80 mm erfüllen die Konstruktion alle DIN-Kriterien. Mit 40 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.

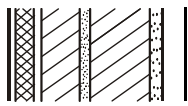
COND: Ab einer Dämmdicke von 80 mm erfüllen die Konstruktion alle DIN-Kriterien. Mit 40 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz nicht eingehalten.

Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss erfüllen die Konstruktionen ab 80 mm Dämmung alle Kriterien. Mit 40 mm ist grundsätzlich der Mindestwärmeschutz nicht gegeben und es kann mit Schlagregeneinwirkung bei allen Dämmdicken das entstandene Kondensat nicht verdunsten. Im Gebäudewinkel ist Schimmelpilzwachstum mit 40 mm Dämmung zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 und 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

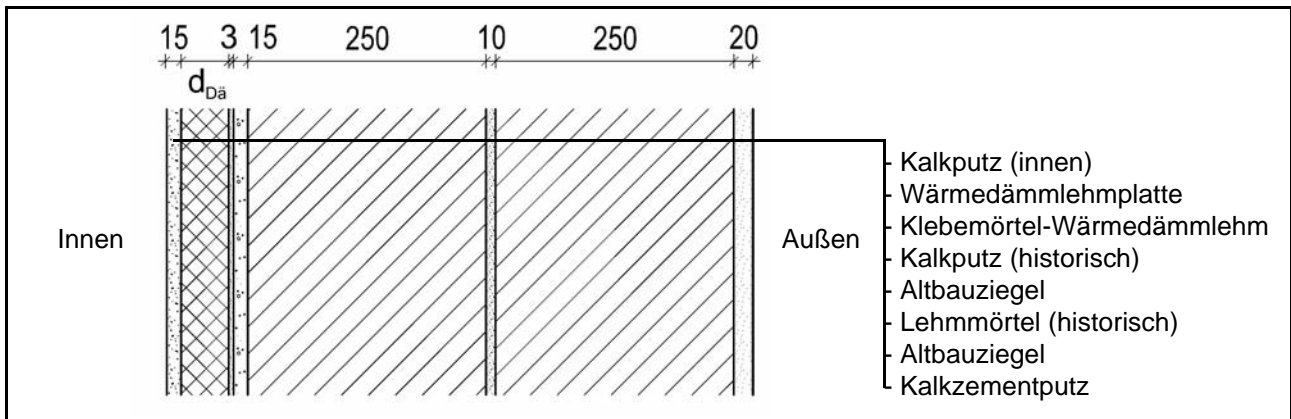
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.2
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.2
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.5
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1



10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 80$ und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Wärmedämmlehmplatte-40mm	350	0,08	26	0,5	42,2	0,003
Wärmedämmlehmplatte-80/100mm	350	0,08	28	0,6	41,8	0,015
Klebemörtel-Wärmedämmlehm	560	0,18	12,6	2,0	78	0,042
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

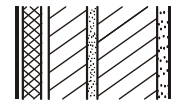
	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,68	1,22	1,72	1,97
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,18	0,72	0,53	0,47
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,072	0,100	0,095
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,732	0,493	0,446
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,590	0,729	0,786	0,805

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,68	1,22	1,72	1,97
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,18	0,72	0,53	0,47
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,732	0,493	0,446
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	59,6	56,9	56,0
Innendämmsystem:					** feuchteabhängig	
s_d -Wert	s_{di}	m	-	1,24	2,44	3,00
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,54	1,04	1,29
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	30,5	16,3	15,4

10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



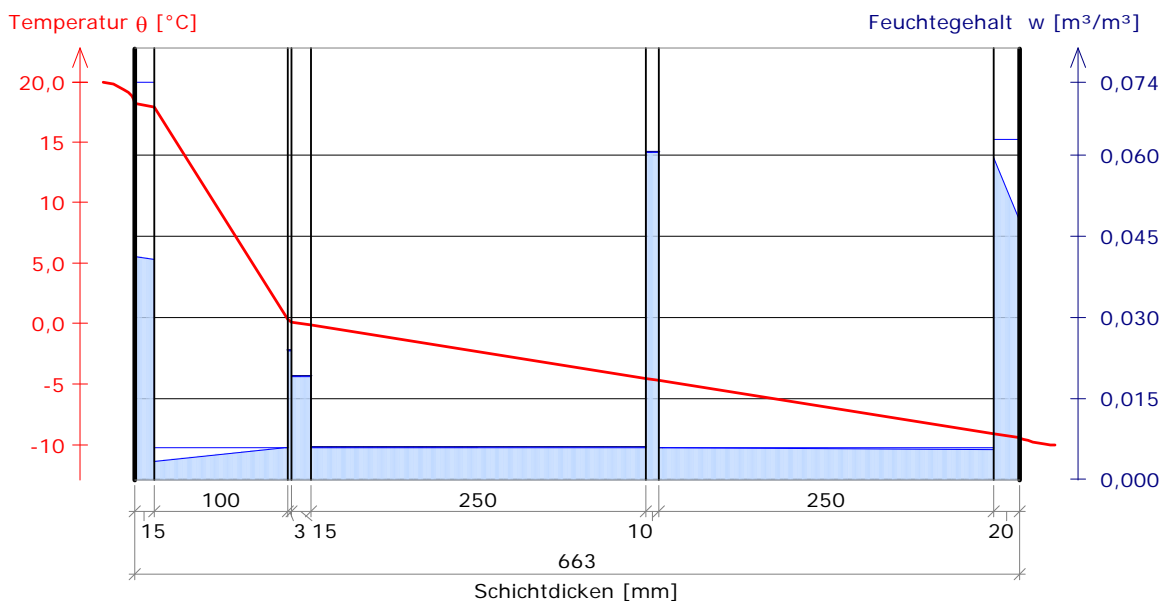
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

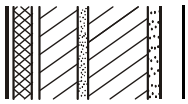
	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 100 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,9	2056	1169	0,042		
				0,042		
2 Wärmedämmlehmplatte	17,6	2015	1136	0,004		
3 Klebemörtel (Wärmedämmlehmplatte)	1,7	692	692	0,007		
				0,024		
4 Kalkputz (historisch)	1,5	679	679	0,024	0,0	0,00
5 Altbauziegel	1,2	665	665	0,019	15,0	0,00
				0,019		
6 Lehmörtel (historisch)	-3,8	446	446	0,006	250,0	0,00
7 Altbauziegel	-4,0	438	438	0,006		
				0,061	10,0	0,00
8 Kalkzementputz	-9,0	285	267	0,061		
				0,006	0,0	0,00
Luftschicht (Außenseite)	-9,4	275	208	0,006		
	-10	260	208	0,059		
				0,048		





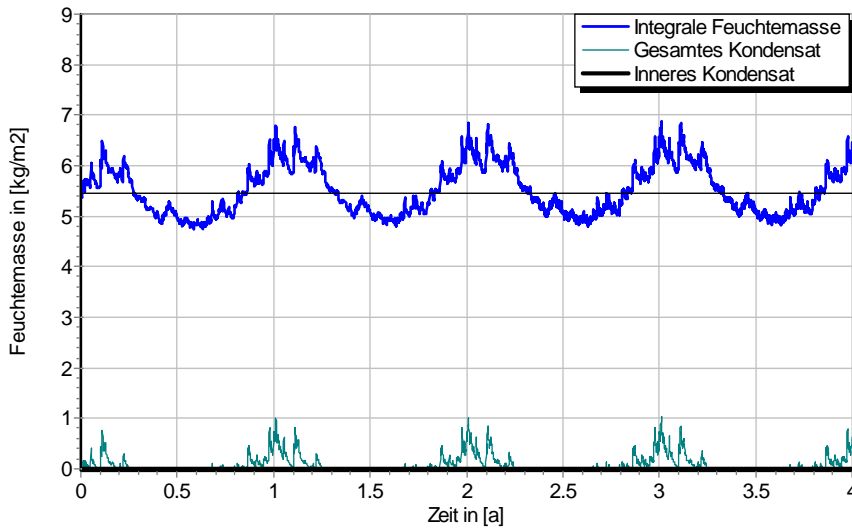
10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



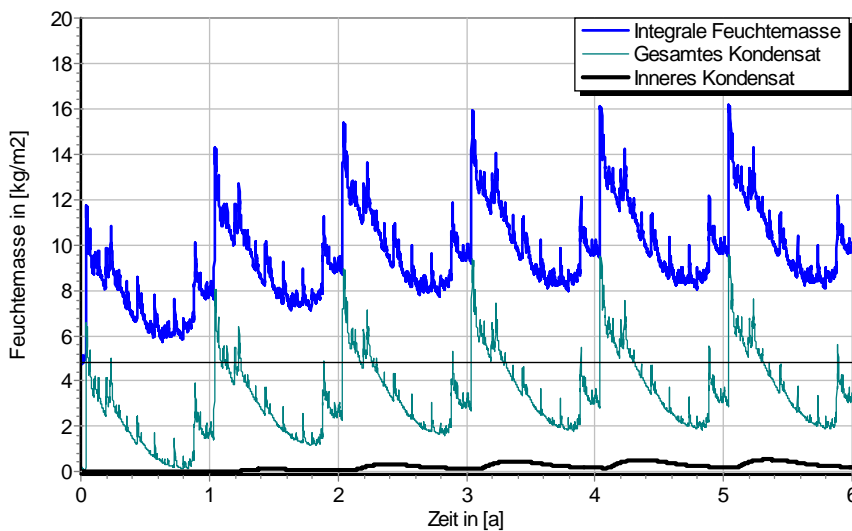
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	1,130	0,837	1,304	1,422
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

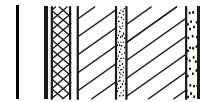


$\Delta m_{W,80}$

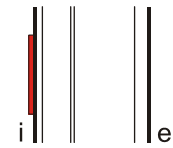
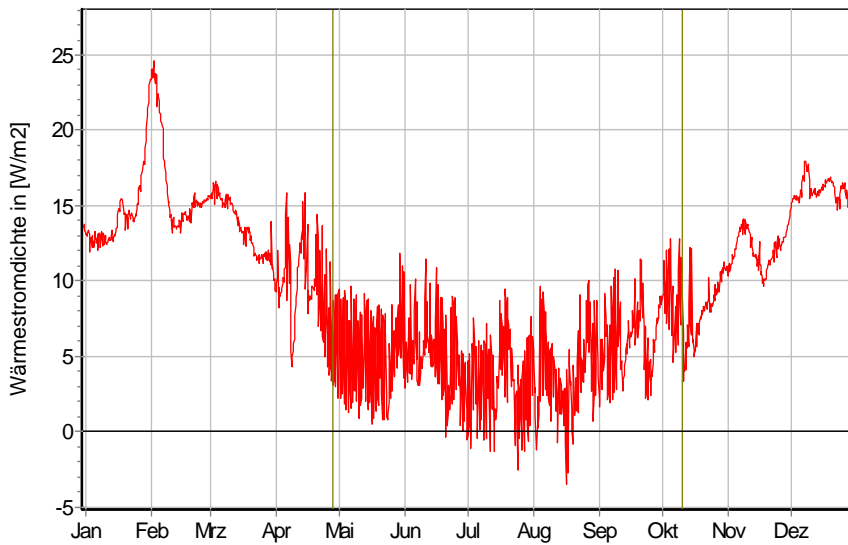
Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	80 mm	100 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,857	11,113	12,637	13,348
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	1,036	1,467	1,798

10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



5.2 Instationäre Wärmeverluste

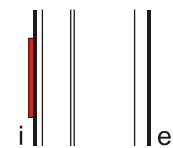
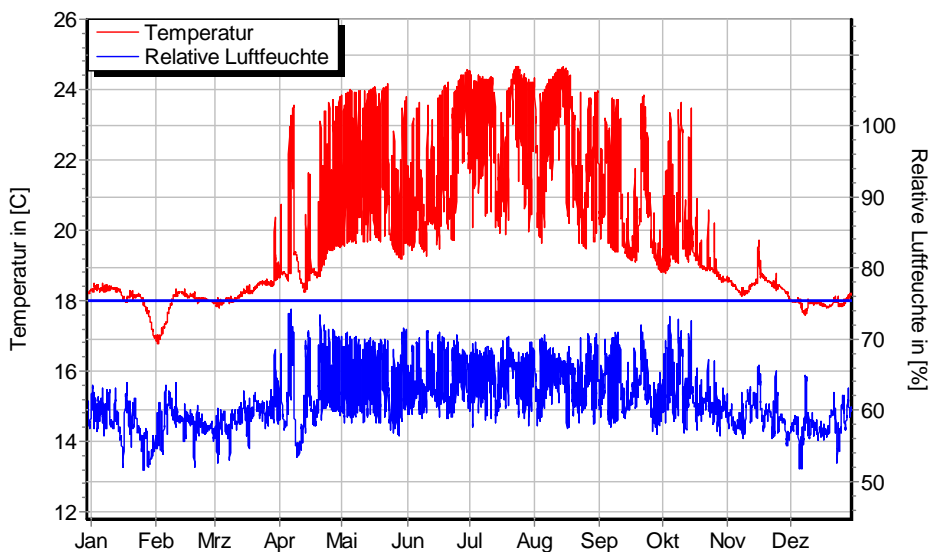


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

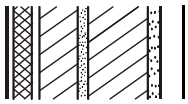
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,48	13,01	9,57	8,44
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,01	0,74	0,54	0,48
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,82	1,18	1,67	1,91

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,17	12,89	9,59	8,51
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1,00	0,73	0,55	0,48
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	0,83	1,19	1,66	1,90

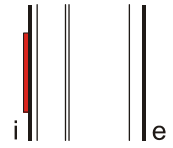
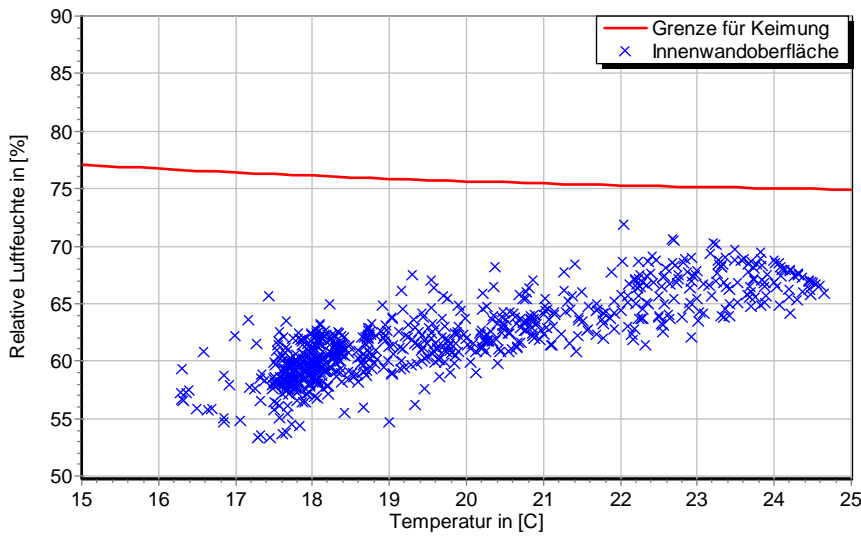
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



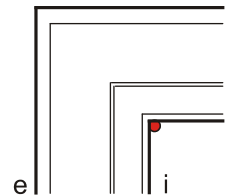
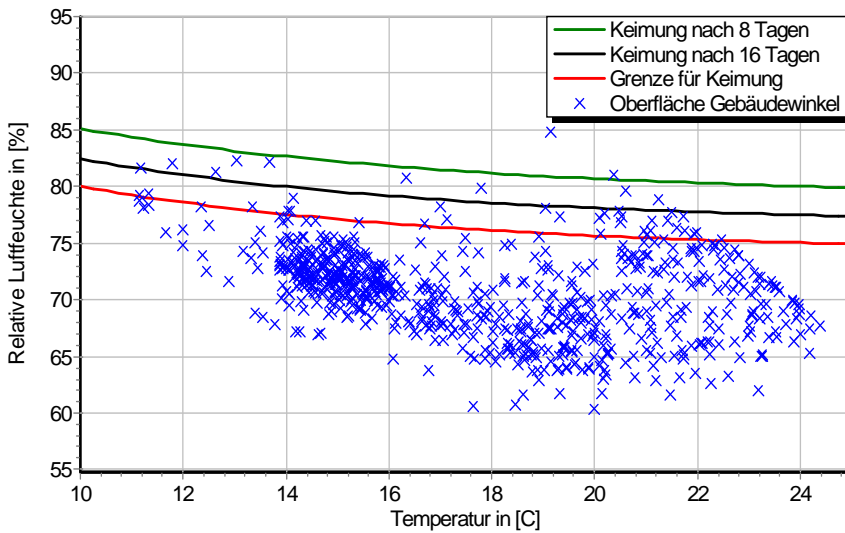
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

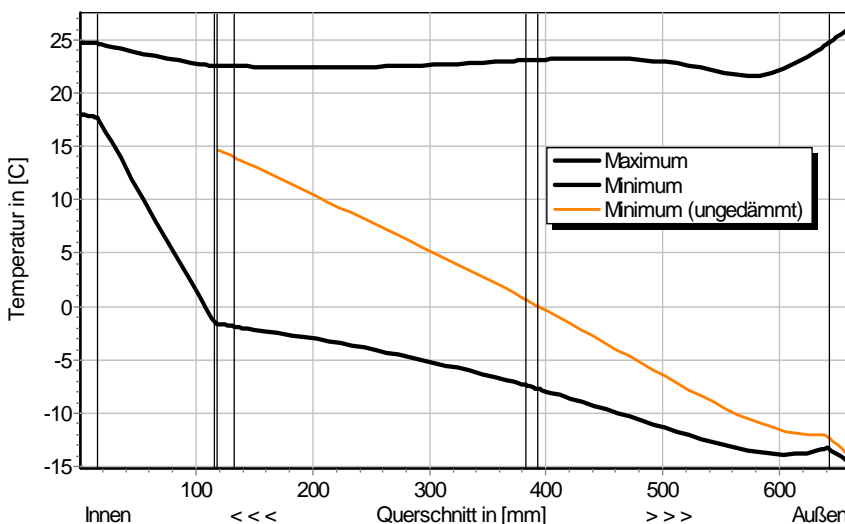


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



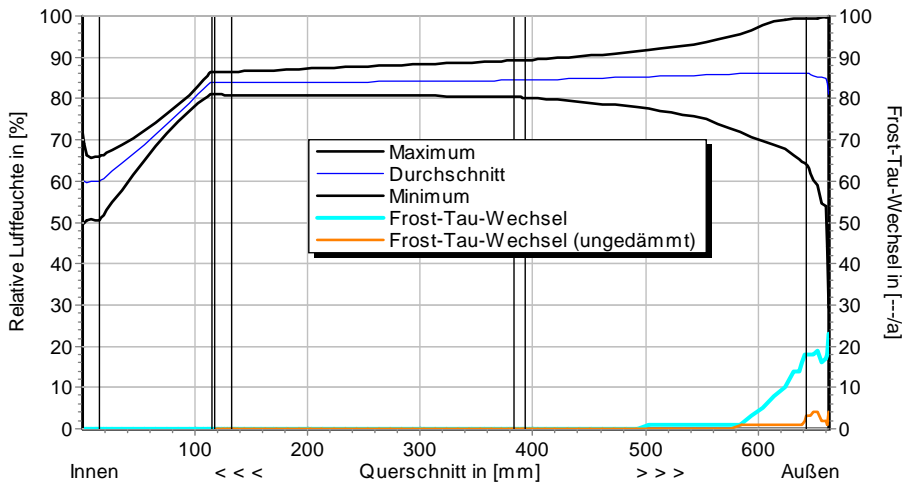
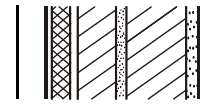
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

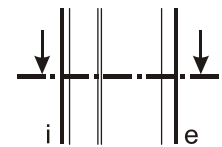
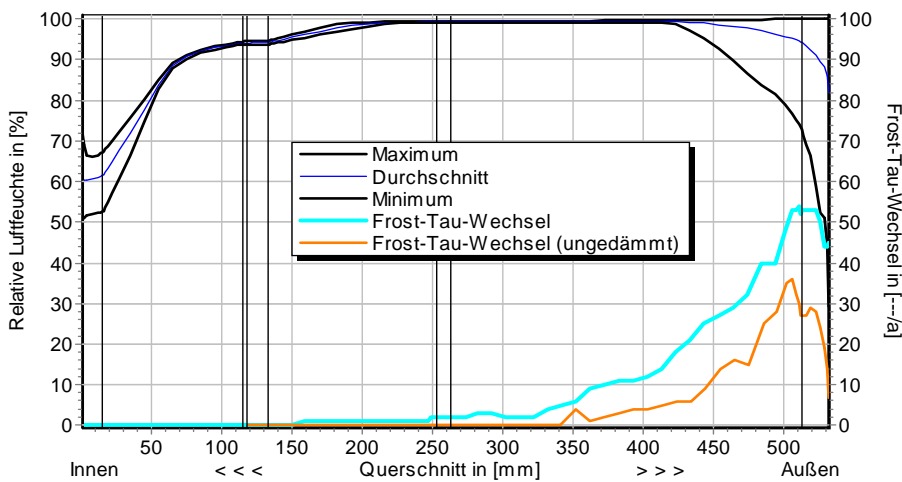


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten



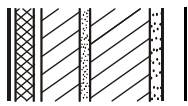
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 100$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	8	12	26	29
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	99,6	98,3	98,1
	WL_w	%	100	92,4	85,1	83,9
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	99,6	101,1	101,0
	CIL_φ	%	100	101,3	95,5	94,9
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	36	43	57	58
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	100,6	98,4	98,2
	WL_w	%	100	99,9	104,2	104,6
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	99,4	98,7	98,5
	CIL_φ	%	100	99,8	102,8	102,7



10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s(\theta)} < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s(\theta)} < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s(\theta)_{Co}} < \text{LIM}$	✗	○	✓	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	✗	✓	✓	✓
COND	✗	✓	✓	✓
Simulation - ohne Schlagregen	✗	✗	✓	✓
Simulation - schlagregenexponiert	✗	✗	○	○

8 Schlussfolgerungen

DIN: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

COND: Alle Konstruktionsvarianten erfüllen die DIN-Kriterien.

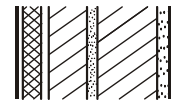
Simulation: Ohne Schlagregeneinfluss werden die Kriterien ab 80 mm Dämmung eingehalten. Mit 40 mm wird der Mindestwärmeschutz grundsätzlich knapp unterschritten, außerdem entstehen mit Schlagregeneinwirkung bei allen Varianten zu hohe Kondensatmengen bzw. ist die Verdunstung des Kondensats nicht mehr gegeben. Im Gebäudewinkel ist kein Schimmelpilzwachstum zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 80 und 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

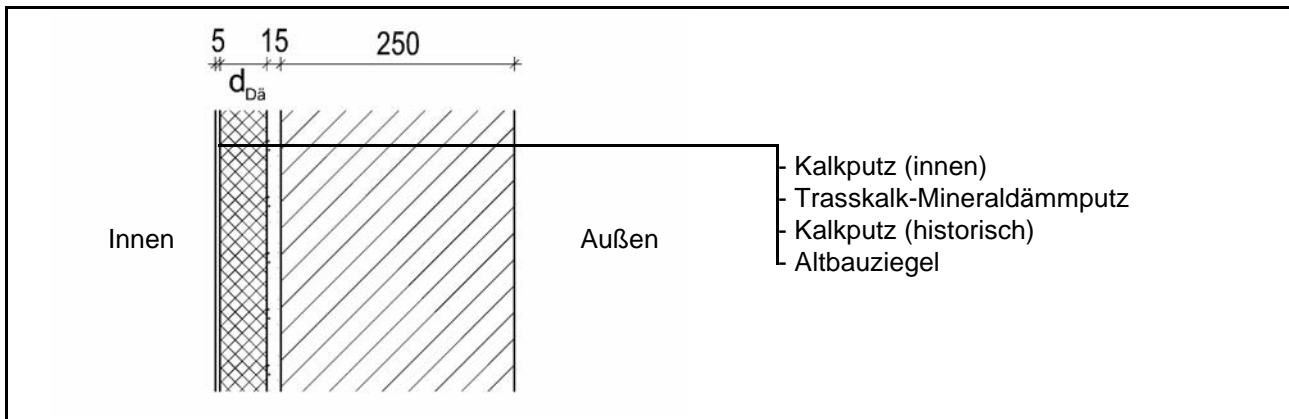
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralewolleplatten: 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.3
- Altbauziegel, aussen WDVS-Dämmung: 12.1

11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{D\ddot{a}}$ = 40, 60 und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Trasskalk-Mineraldämmputz	610	0,10	6,9	6,0	48,7	0,211
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

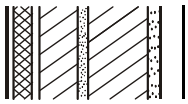
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,331	0,74	0,94	1,14
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,997	1,10	0,90	0,76
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	1,087	0,966	0,852
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,101	1,562	1,268
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,464	0,638	0,685	0,719

* mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,331	0,71	0,91	1,10
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,997	1,13	0,93	0,79
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,792	0,728	0,646
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,101	1,562	1,268
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	82,1	66,0	62,8	60,6
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,47	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,41	0,61	0,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,4	28,3	22,2



11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz

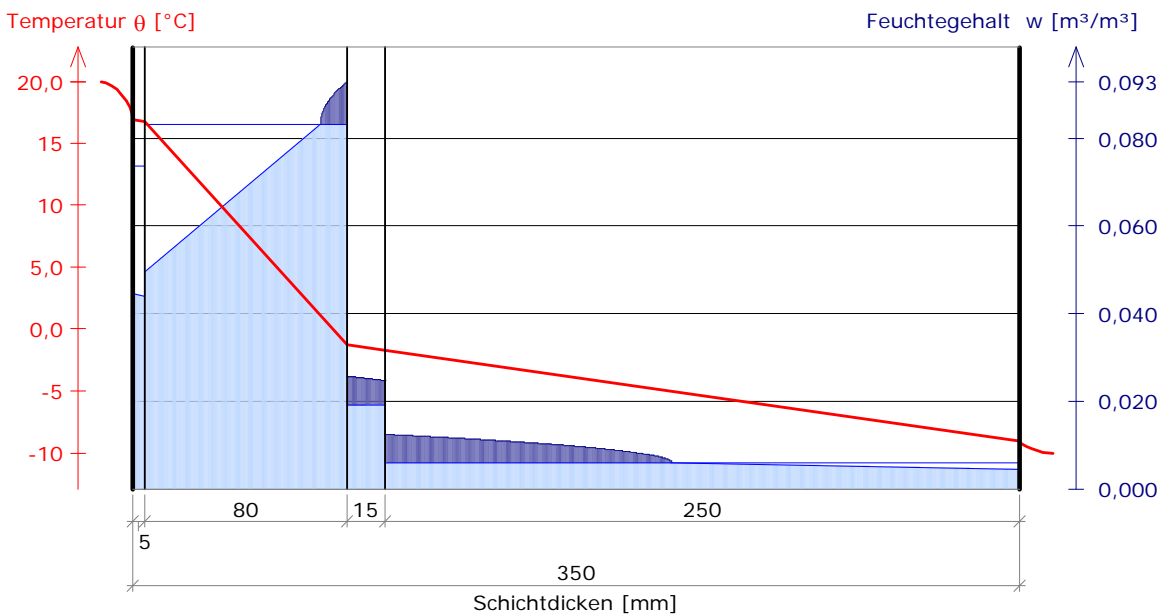
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniiert		40 mm		60 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗

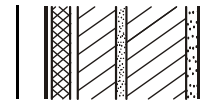
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	$\theta \text{ [}^\circ\text{C]}$	$P_{\text{sat}} \text{ [Pa]}$	$P \text{ [Pa]}$	$w \text{ [m}^3/\text{m}^3]$	$d_{\text{cap}} \text{ [mm]}$	$M_{\text{cap}} \text{ [kg/m}^2]$
Luftschicht (Innenseite)	20,0 16,9	2338 1930	1169 1169			
1 Kalkputz (innen)				0,045 0,044		
2 Trasskalk-Mineraldämmputz	16,8	1911	1139	0,050 0,093	10,8	0,07
3 Kalkputz (historisch)	-1,3	551	551	0,025 0,024	15,0	0,09
4 Altbauziegel	-1,7	531	531	0,012 0,004	112,8	0,49
Luftschicht (Außenseite)	-9,1 -10	283 260	208 208			



11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz

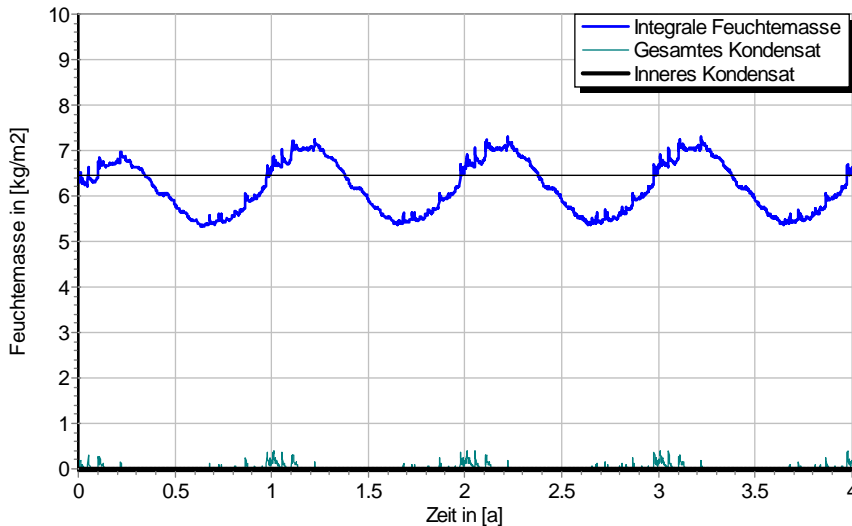


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



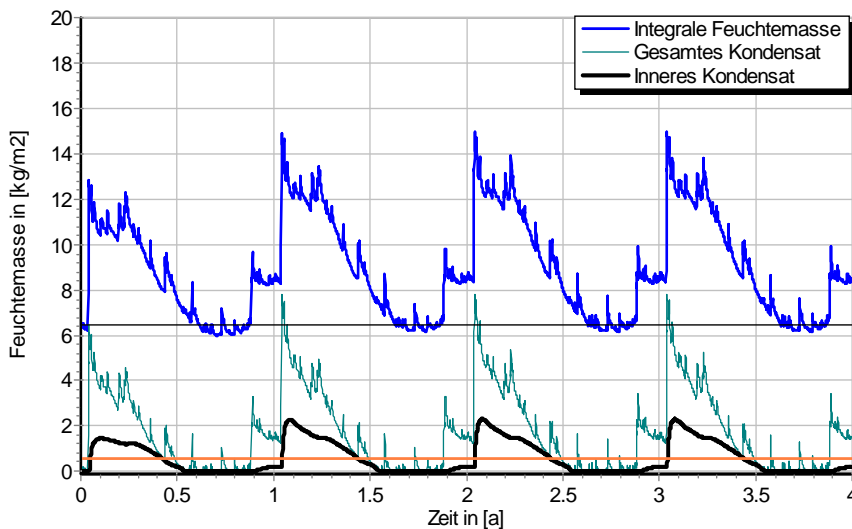
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,244	0,707	0,804	0,846
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

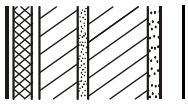


$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert, maximales inneres Kondensat der unsanierten Variante in orange

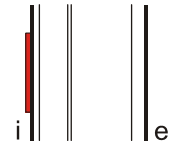
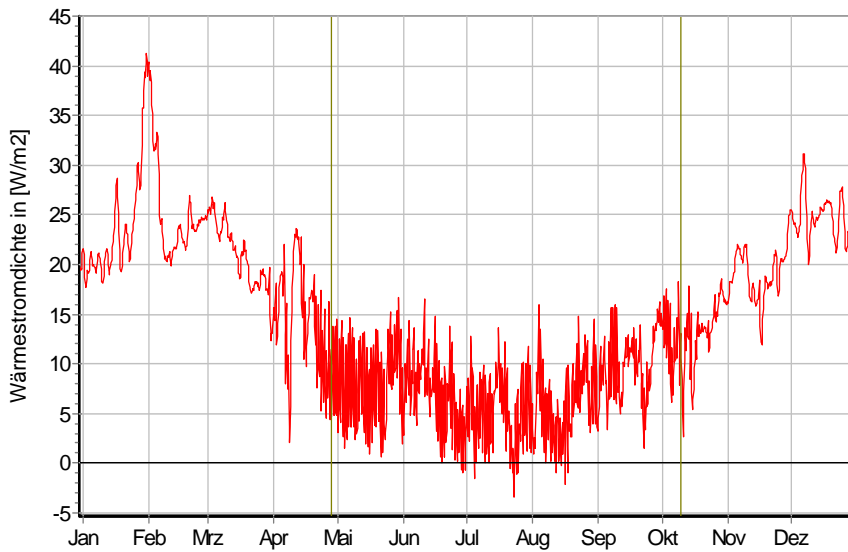
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,163	7,691	8,086	8,513
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,680	1,053*	1,350*	1,623*

* beinhaltet nur die durch die Dämmung verursachte, zusätzliche Kondensatmenge



11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz

5.2 Instationäre Wärmeverluste

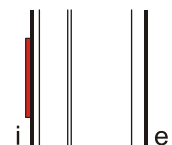
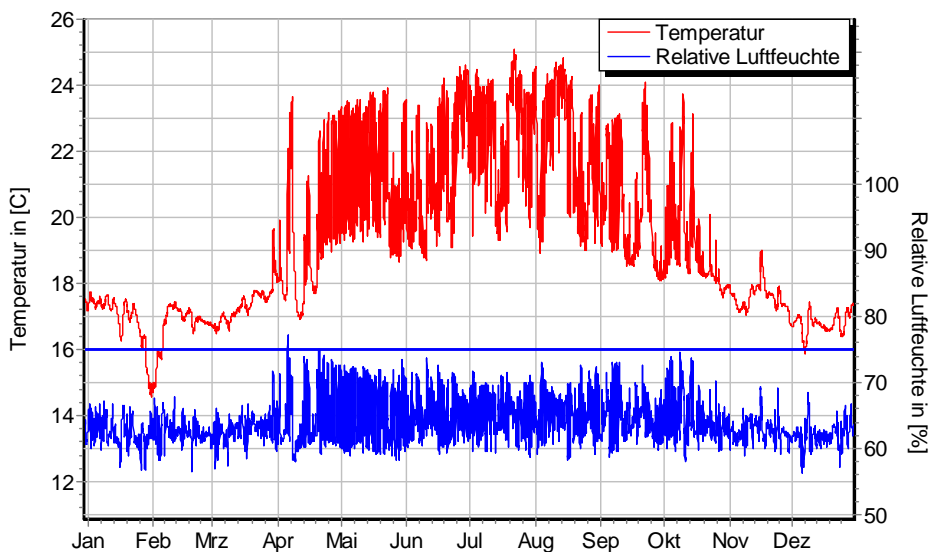


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,48	20,27	16,50	13,86
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,07	1,15	0,94	0,79
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,31	0,70	0,90	1,10

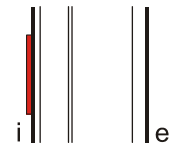
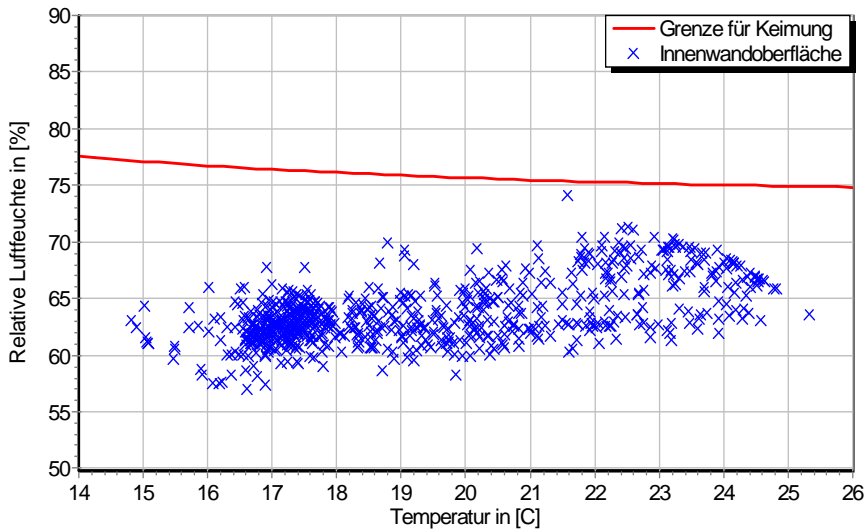
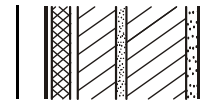
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	36,06	20,21	16,54	14,06
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	2,05	1,15	0,94	0,80
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,32	0,70	0,89	1,08

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

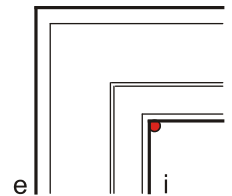
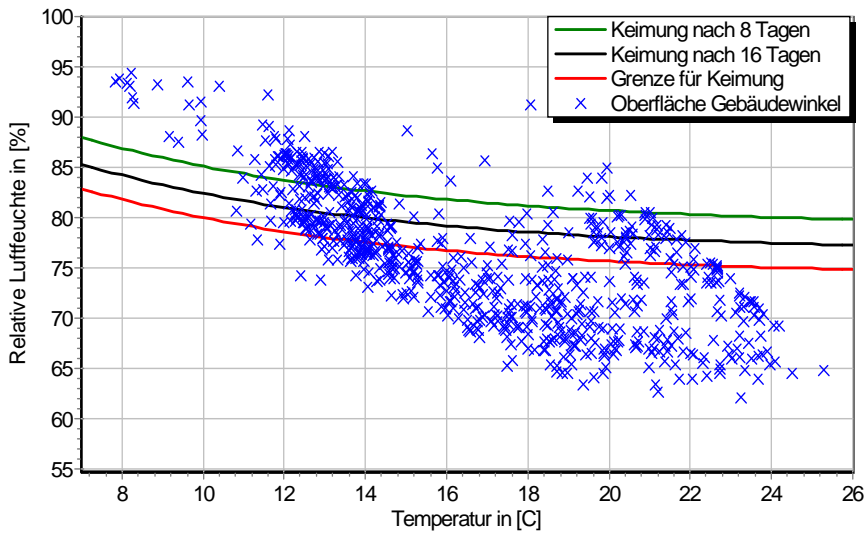


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz

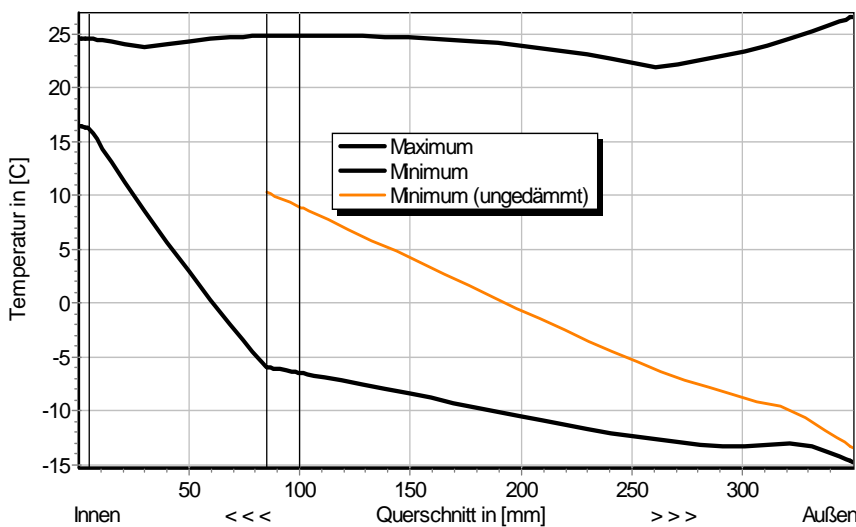


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

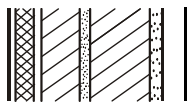


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

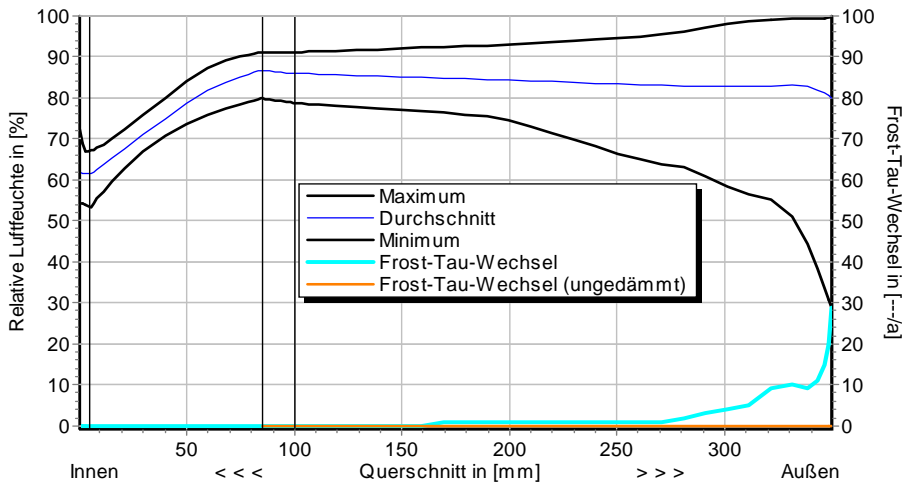
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



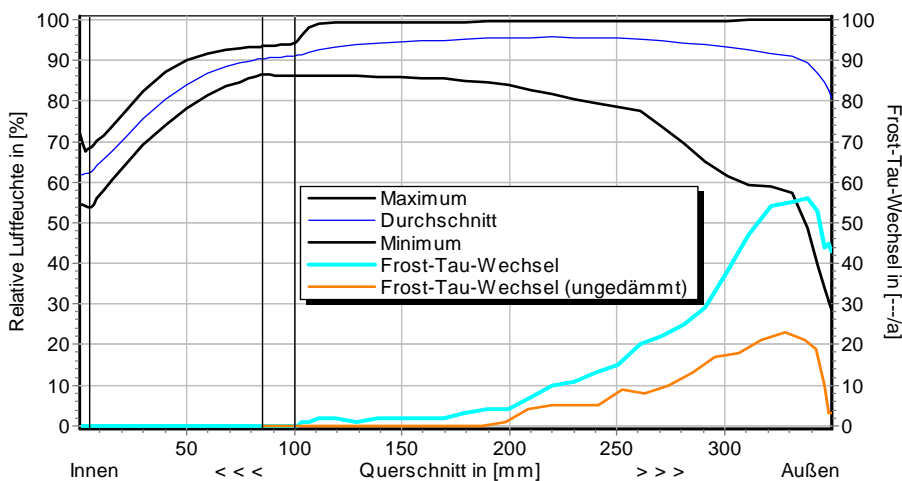
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

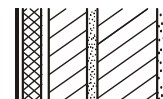


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	20	26	31
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	95,0	94,6	94,3
	WL_w	%	100	100,8	105,9	111,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,5	94,3	94,2
	CIL_φ	%	100	96,3	95,1	93,7
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	28	46	53	57
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	96,2	95,7	95,4
	WL_w	%	100	112,1	116,4	118,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	94,4	93,7	93,2
	CIL_φ	%	100	100,2	99,6	98,9

11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	✗	✗

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen fehlendem Mindestwärmeschutz und mit 40 mm Dämmung wegen zu hoher Kondensatmenge.

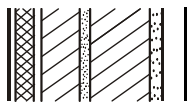
COND: Keine Konstruktion erfüllt die DIN-Kriterien wegen fehlendem Mindestwärmeschutz, die maximal erlaubte Kondensatmenge wird nie überschritten.

Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist nie gegeben. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge entstehen zu hohe Kondensatmengen, die Verdunstung des Kondensats ist gewährleistet. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist mit jeder getesteten Dämmdicke zu erwarten.

Vorzugsvarianten: keine (bei Verwendung eines Wärmedämmputzes mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit wären positivere Ergebnisse zu verzeichnen).

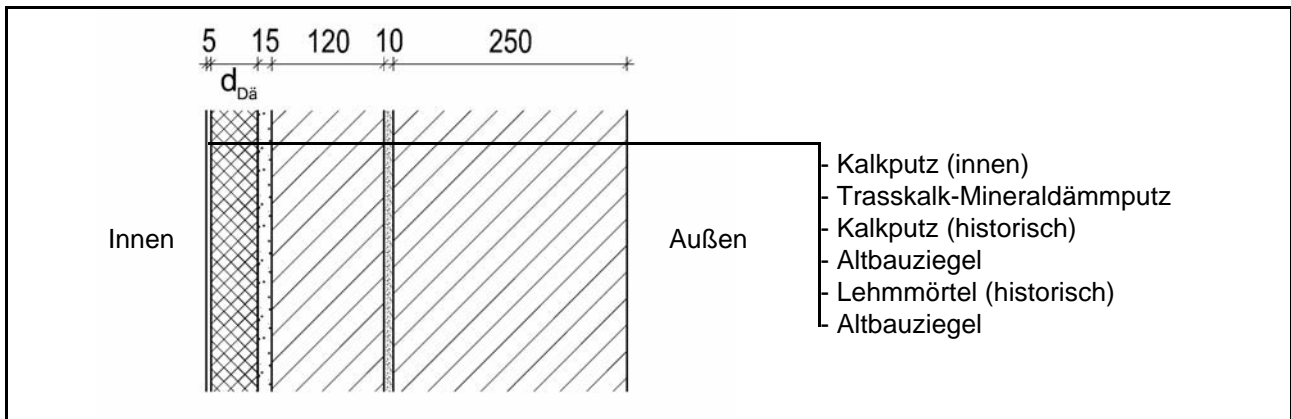
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.1
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.1
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.1



11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 60$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_W
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Trasskalk-Mineraldämmputz	610	0,10	6,9	6,0	48,7	0,211
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

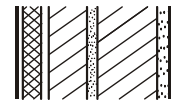
	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,49	0,90	1,10	1,30
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,50	0,93	0,79	0,68
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,686	0,737	0,693
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,108	1,569	1,275
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,528	0,671	0,709	0,737

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsanirt	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,49	0,89	1,08	1,27
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,50	0,95	0,80	0,69
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,526	0,571	0,529
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,108	1,569	1,275
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{Si}	%	72,5	63,0	60,8	59,2
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,47	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,41	0,61	0,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,4	28,3	22,2

11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz



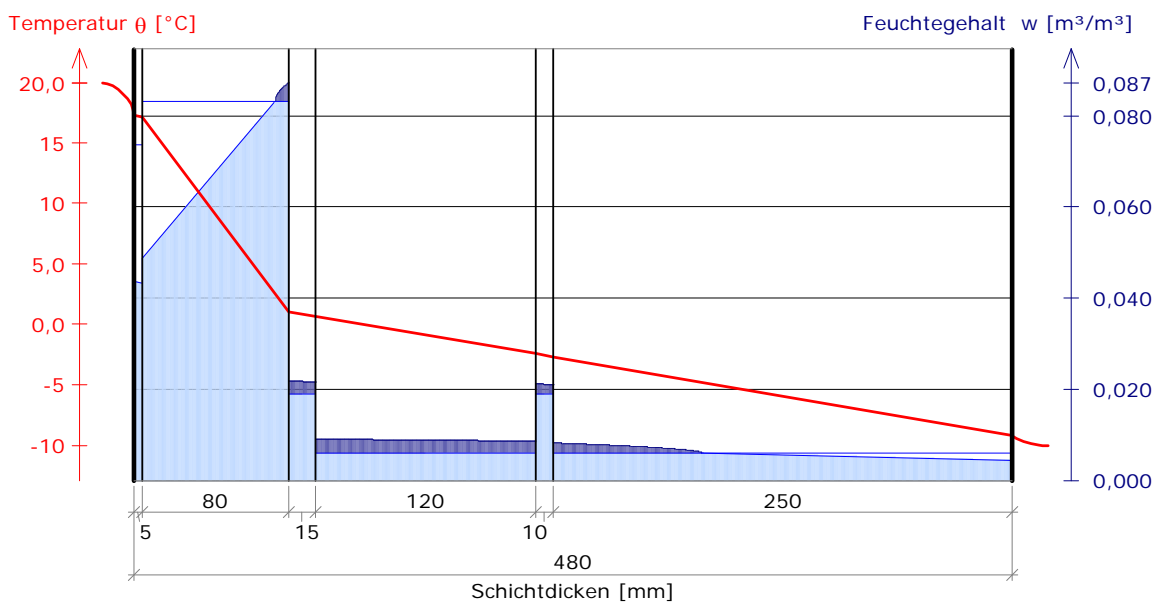
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

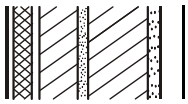
	Bedingung	Unsanier		40 mm		60 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	17,3	1975	1169	0,044		
				0,043		
2 Trasskalk-Mineraldämmputz	17,2	1958	1148	0,049		
				0,087	7,6	0,02
3 Kalkputz (historisch)	1,0	659	659	0,022	15,0	0,04
				0,021		
4 Altbauziegel	0,7	641	641	0,009	120,0	0,33
				0,008		
5 Kalkputz (historisch)	-2,4	500	500	0,021	10,0	0,02
				0,021		
6 Altbauziegel	-2,7	489	489	0,008	81,0	0,12
				0,004		
Luftschicht (Außenseite)	-9,2	280	208			
	-10	260	208			





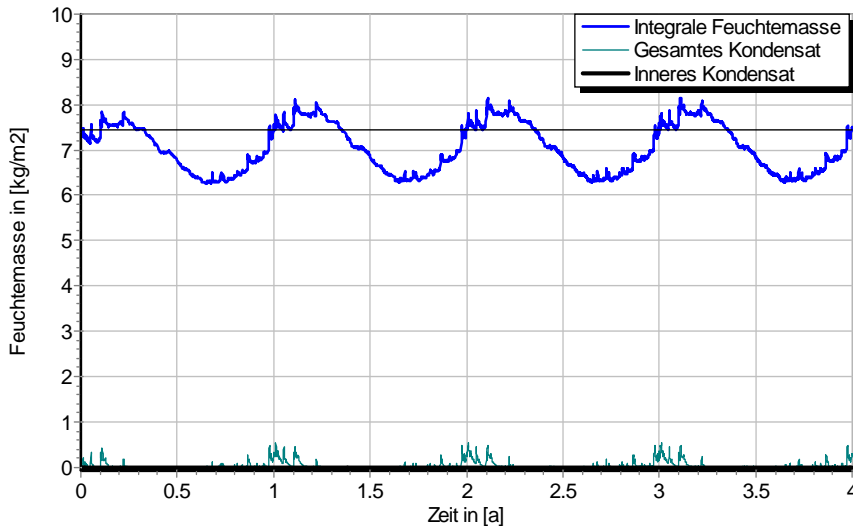
11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



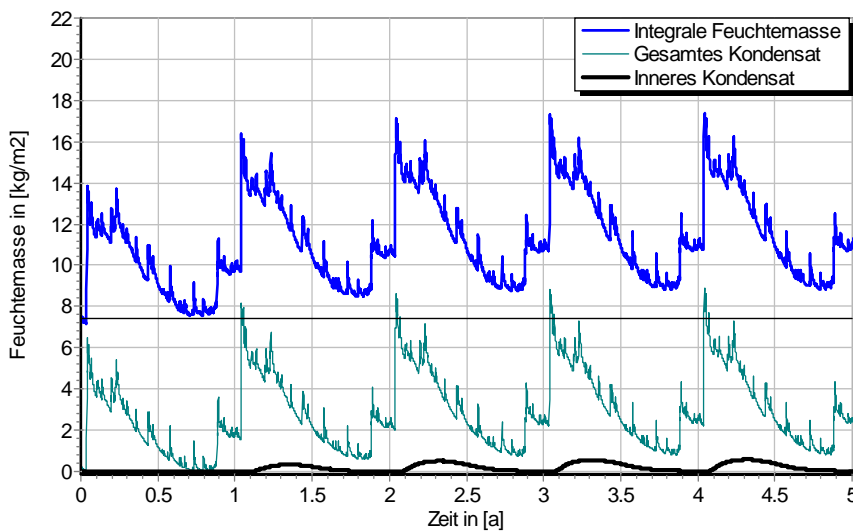
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 ohne Schlagregen
 (Nord)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,35	0,531	0,653	0,701
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

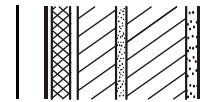


$\Delta m_{W,80}$

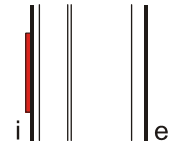
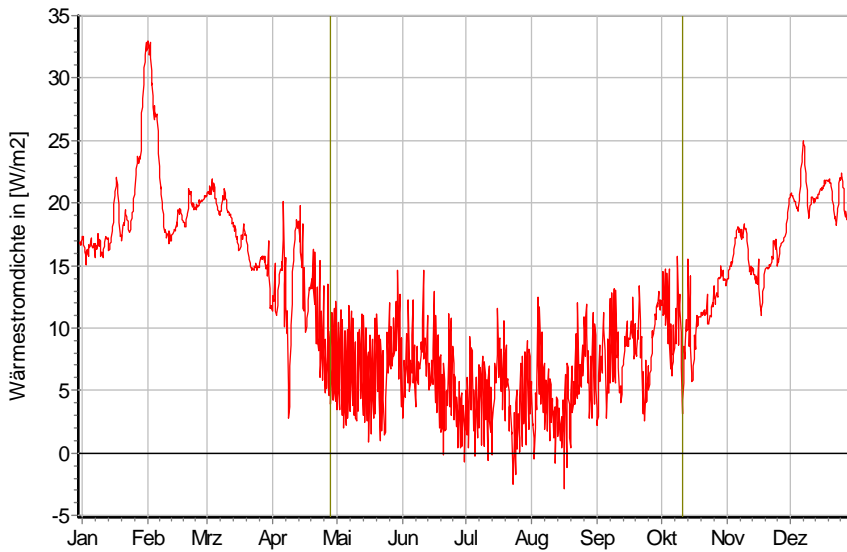
Wassermassen
 für $d_{Dä} = 80$ mm,
 schlagregenexponiert
 (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,927	8,122	9,124	9,974
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,098	0,335	0,592

11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz



5.2 Instationäre Wärmeverluste

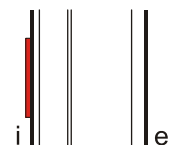
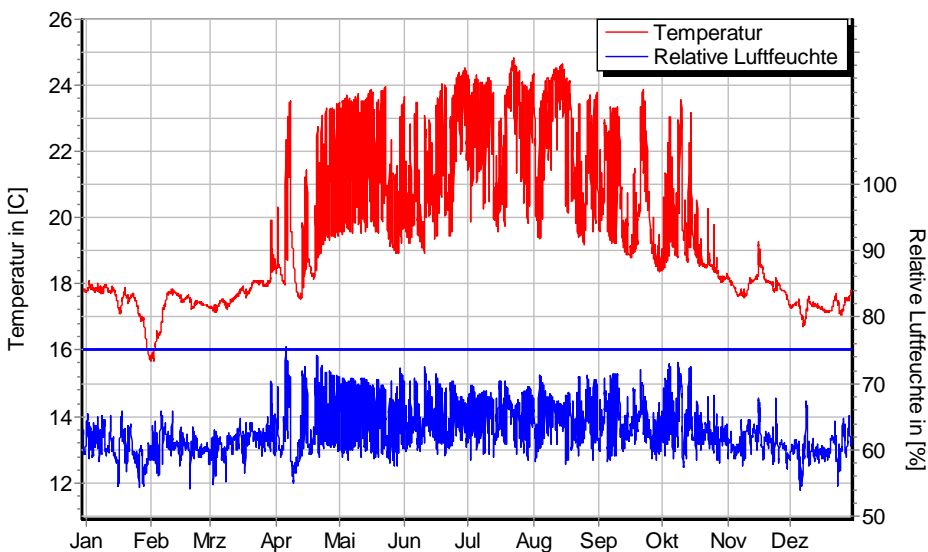


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

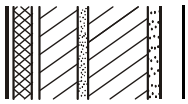
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,42	16,88	14,15	12,17
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1,56	0,96	0,81	0,69
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	0,47	0,87	1,07	1,28

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	27,08	16,75	14,17	12,31
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	1,54	0,95	0,81	0,70
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	0,48	0,88	1,07	1,26

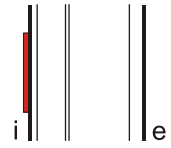
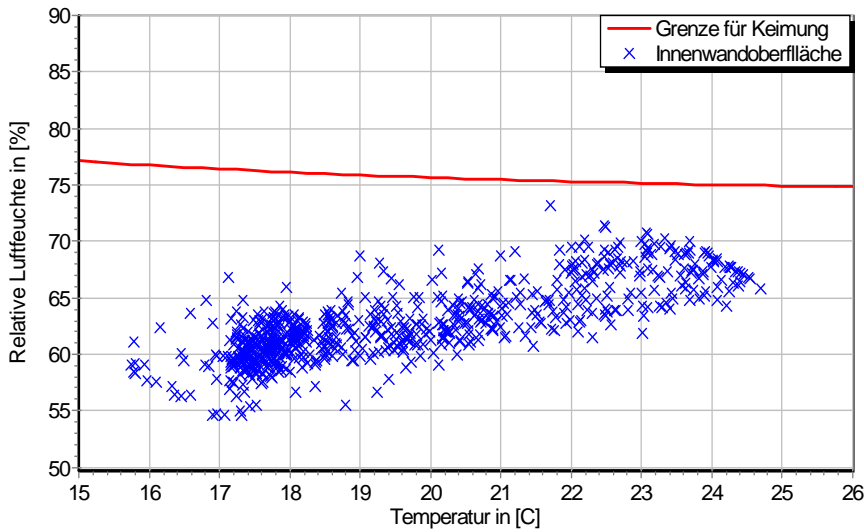
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



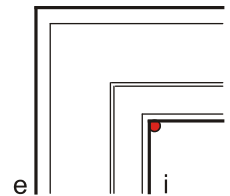
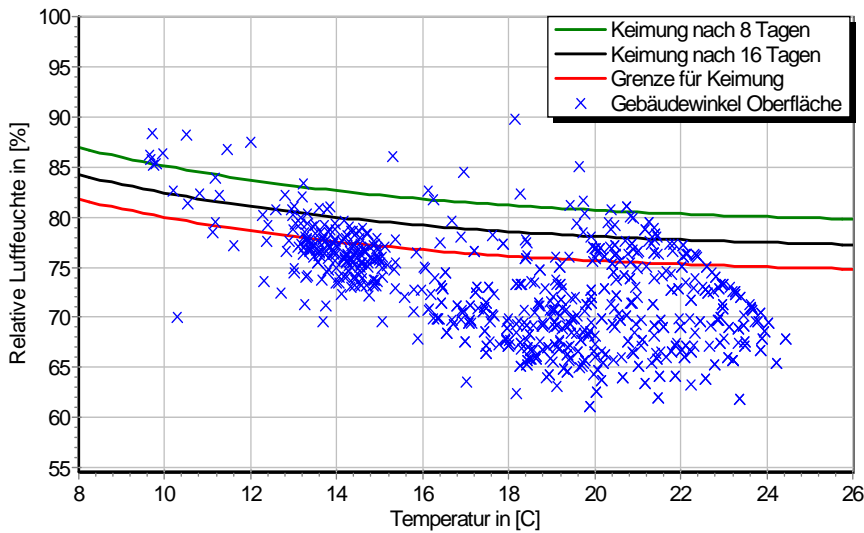
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz

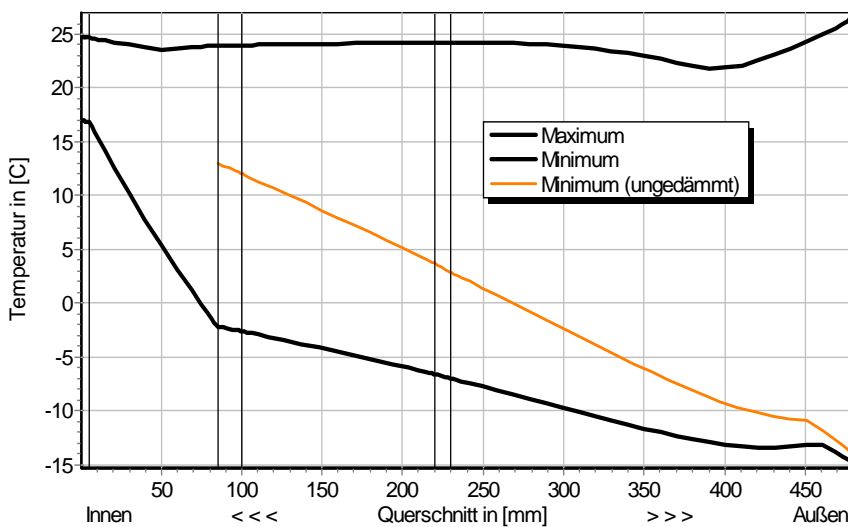


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



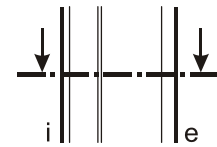
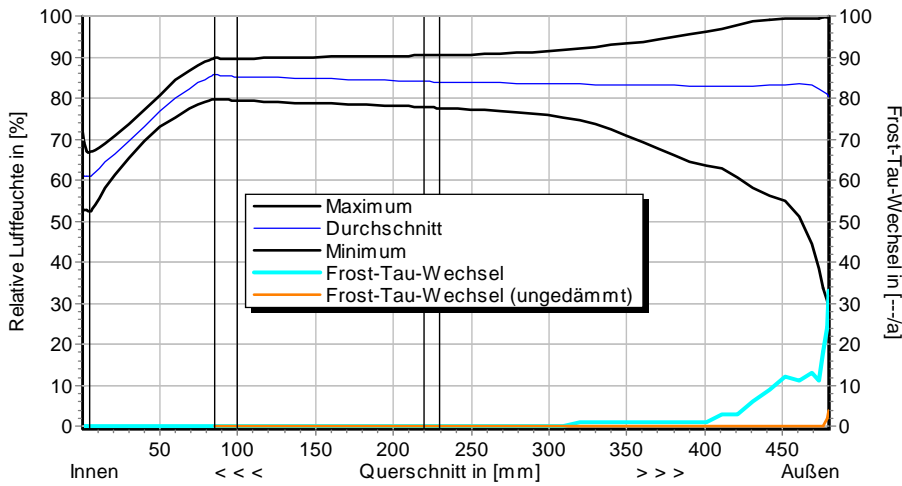
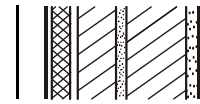
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40$ mm, Nordwestwinkel mit Schlagregen

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

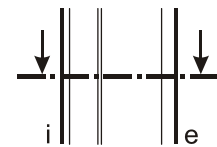
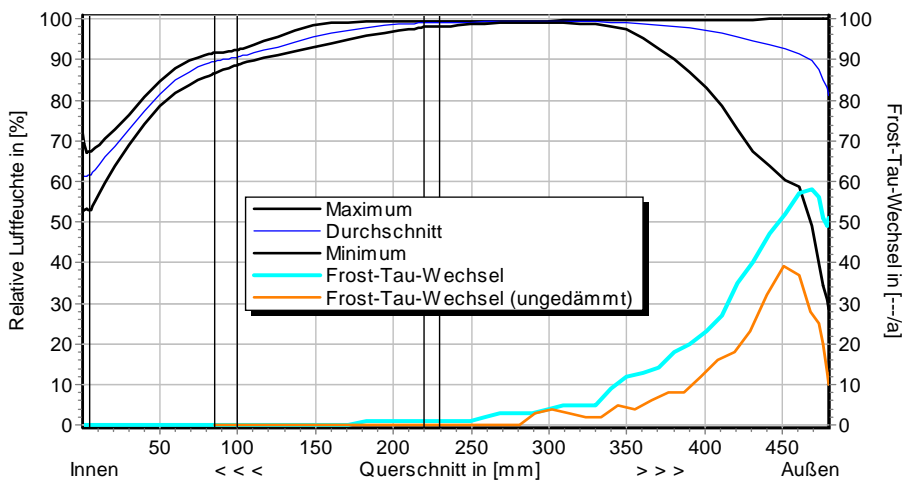


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz



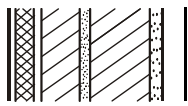
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	10	26	31	35
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	88,4	88,1	87,9
	WL_w	%	100	110,2	116,5	120,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,8	97,0	97,1
	CIL_φ	%	100	97,2	95,8	94,8
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	39	53	57	60
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	89,4	89,0	88,7
	WL_w	%	100	111,3	113,7	115,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	96,7	96,3	96,1
	CIL_φ	%	100	99,5	98,9	98,5



11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	✗	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

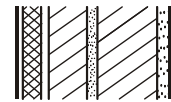
- DIN: Nur mit 80 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz erfüllt, die maximal erlaubte Kondensatmenge wird nie überschritten.
- COND: Nur mit 80 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz erfüllt, die maximal erlaubte Kondensatmenge wird nie überschritten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist nur mit 80 mm Dämmung gegeben. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge ist mit 80 mm Dämmung die Verdunstung des Kondensats nicht gewährleistet, der Grenzwert für Kondensat wird eingehalten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist ab 80 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Bedingungen zu erwarten.

Vorzugsvariante: 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

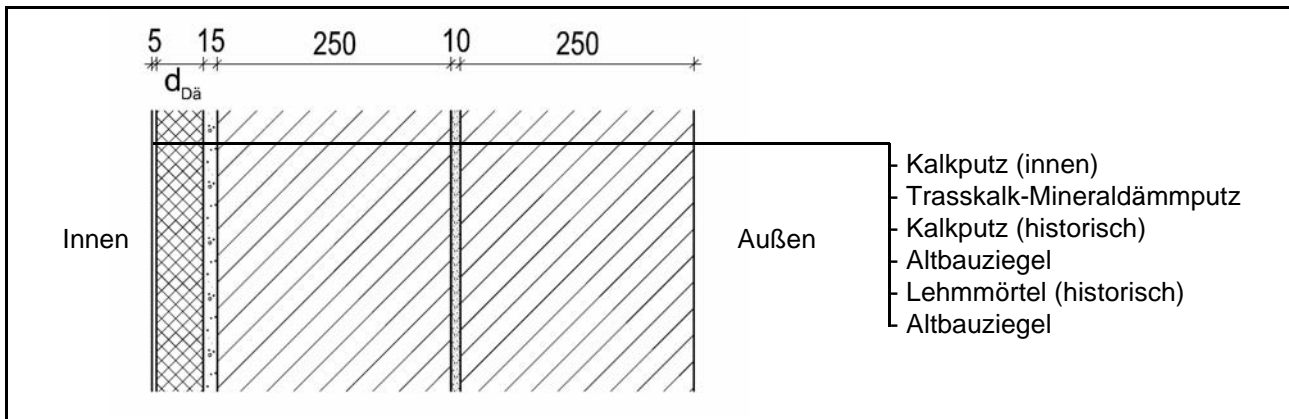
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatte, außen unverputzt: 4.2
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.2
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.2

11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz



1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 40, 60$ und 80 mm

Material	ρ	λ_R	μ	W_{80}	W_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Trasskalk-Mineraldämmputz	610	0,10	6,9	6,0	48,7	0,211
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333

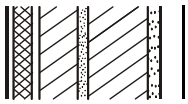
2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,656	1,09	1,29	1,49
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,211	0,79	0,68	0,60
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,277	0,489	0,527
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,124	1,585	1,291
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,583	0,699	0,730	0,754

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniiert	40 mm	60 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,656	1,09	1,28	1,47
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,211	0,79	0,69	0,61
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,170	0,354	0,376
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	2,124	1,585	1,291
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	66,7	60,7	59,2	58,0
Innendämmsystem:						** feuchteabhängig
s_d -Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,47	0,61
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	0,41	0,61	0,81
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	34,3	28,3	22,2



11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz

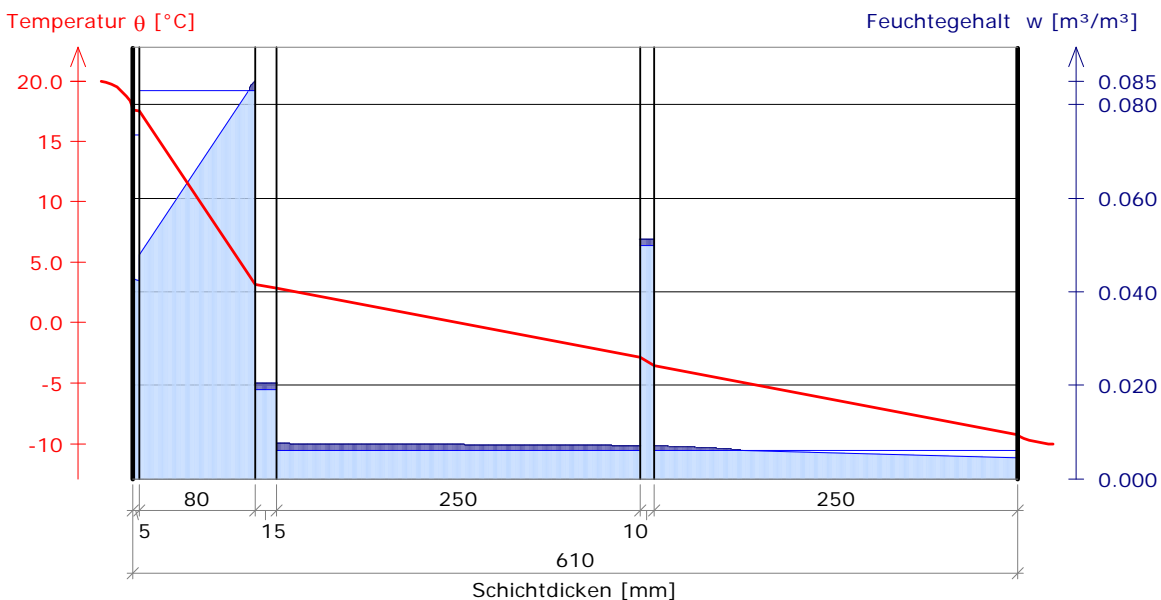
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsanier		40 mm		60 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

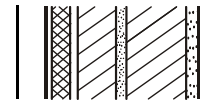
4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 80 \text{ mm}$

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_{cap} [mm]	M_{cap} [kg/m²]
Luftschicht (Innenseite)	20.0 17.6	2338 2016	1169 1169			
1 Kalkputz (innen)	17.5	2001	1152	0.043 0.042		
2 Trasskalk-Mineraldämmputz	3.2	767	767	0.085 0.020	4.6	0.01
3 Kalkputz (historisch)	2.8	749	749	0.007	15.0	0.02
4 Altbauziegel	-2.8	483	483	0.007	250.0	0.30
5 Kalkzementmörtel	-3.6	454	454	0.051 0.051	10.0	0.01
6 Altbauziegel	-9.3	277	208	0.007 0.004	60.5	0.04
Luftschicht (Außenseite)	-10	260	208			



11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz

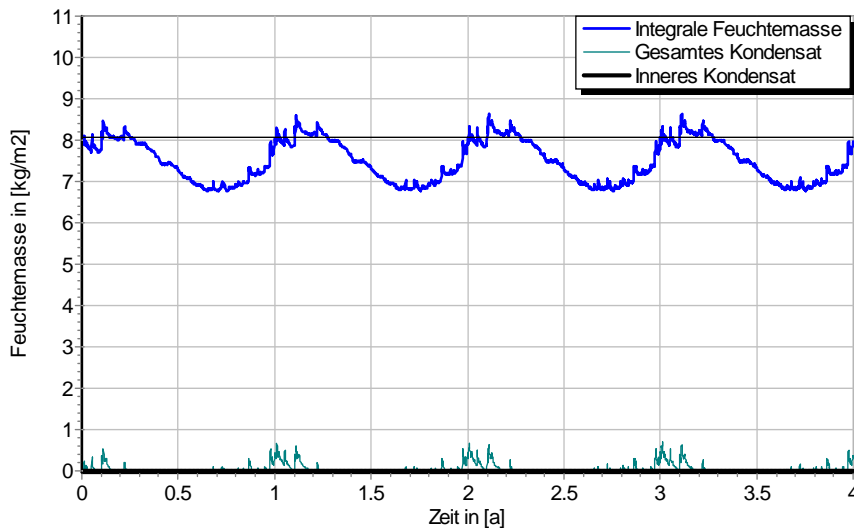


5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



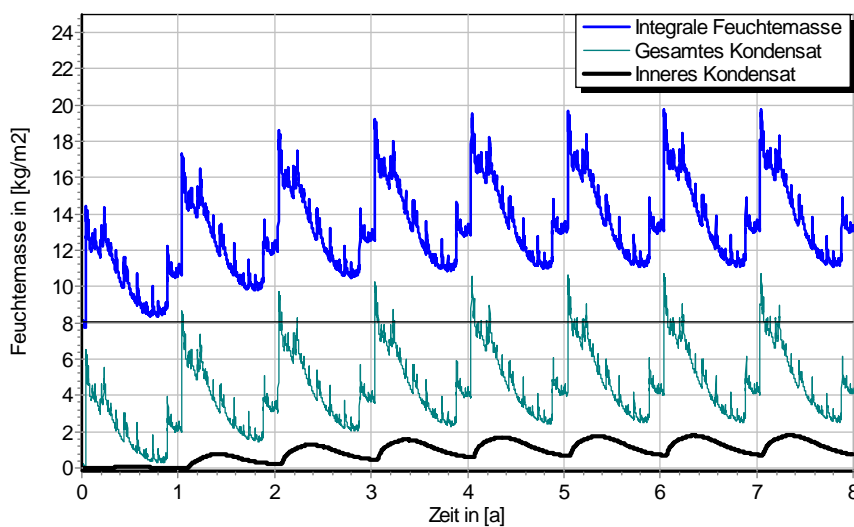
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

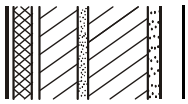
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0434	0,401	0,524	0,576
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0



$\Delta m_{W,80}$

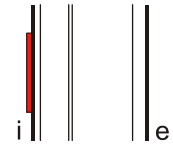
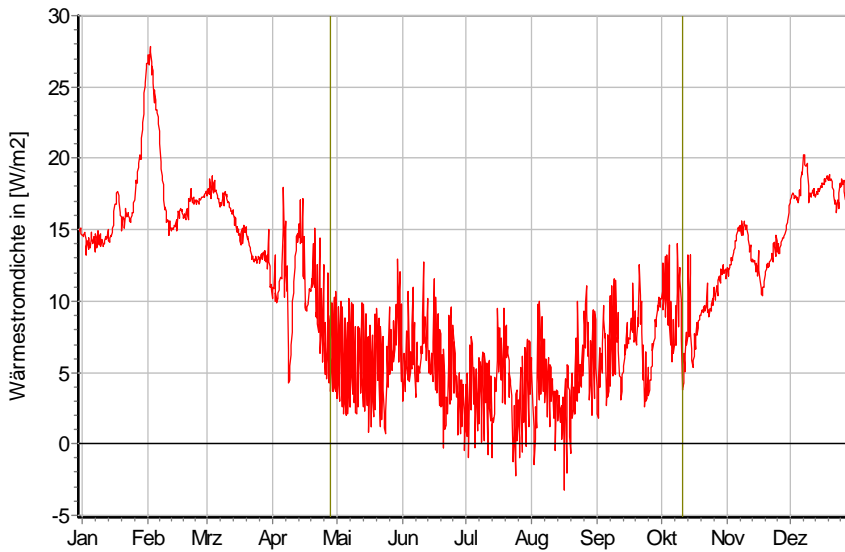
Wassermassen für $d_{D\ddot{a}} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	7,446	9,601	10,765	11,864
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,741	1,335	1,809



11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz

5.2 Instationäre Wärmeverluste

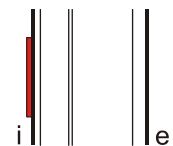
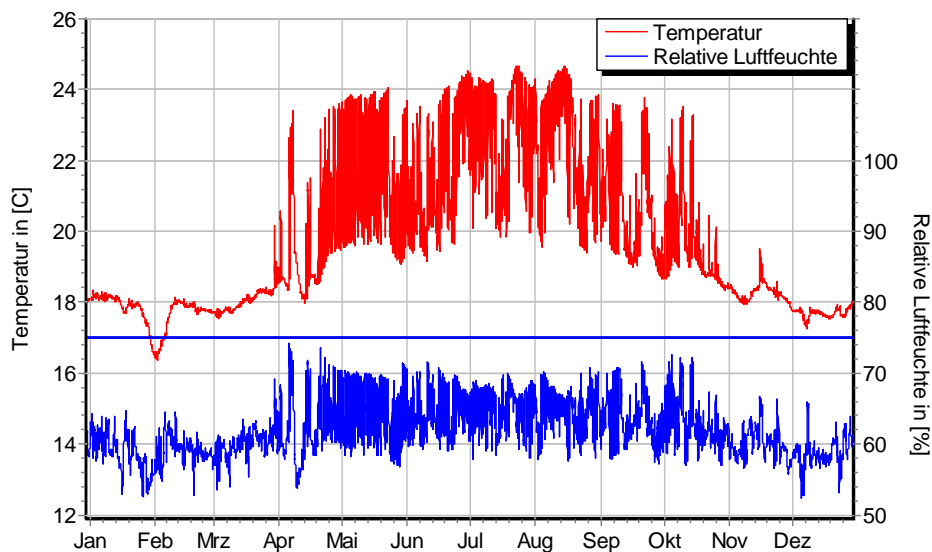


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	22,02	14,55	12,46	10,90
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,25	0,83	0,71	0,62
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,63	1,04	1,24	1,44

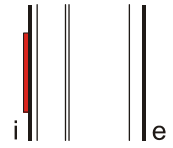
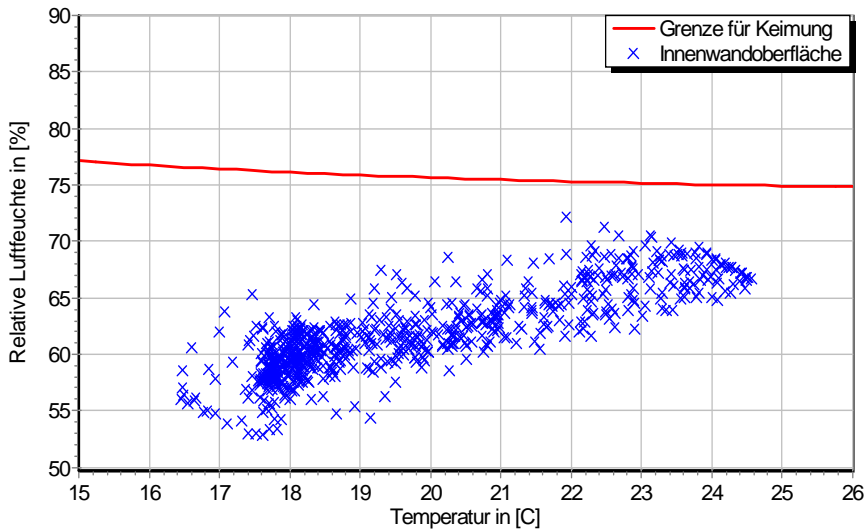
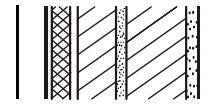
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert	40 mm	60 mm	80 mm
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	21,73	14,45	12,45	10,96
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,24	0,82	0,71	0,62
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,64	1,05	1,24	1,43

5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

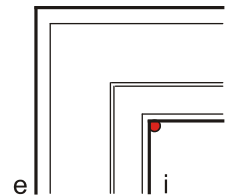
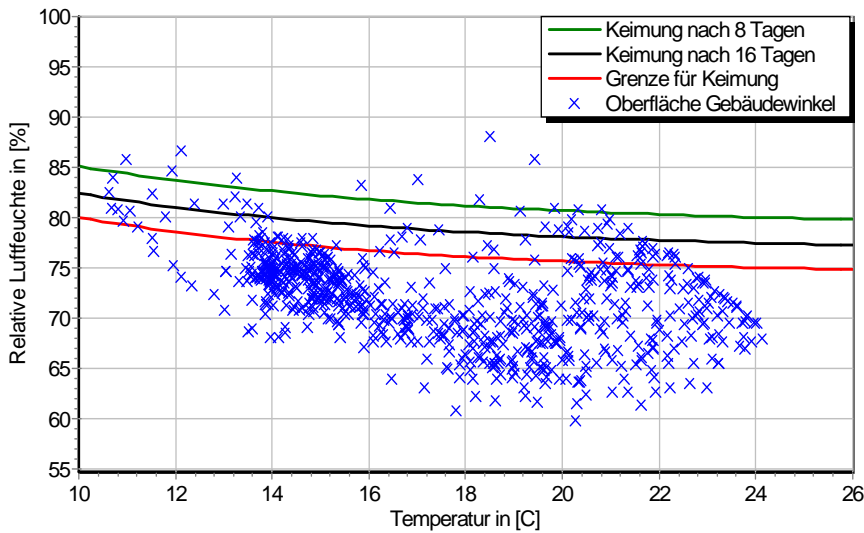


Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 40$ mm, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz

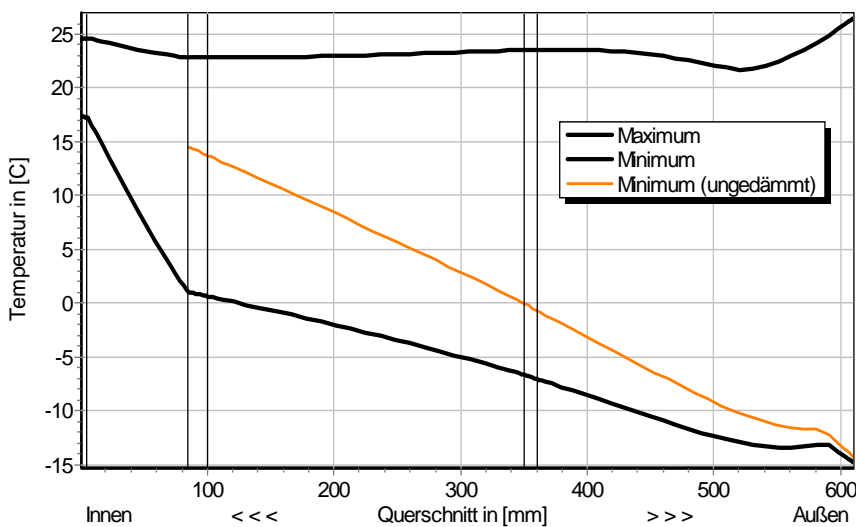


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

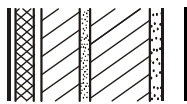


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isolethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 40 \text{ mm}$, Nordwestwinkel mit Schlagregen

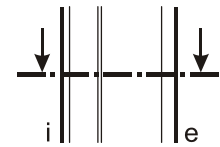
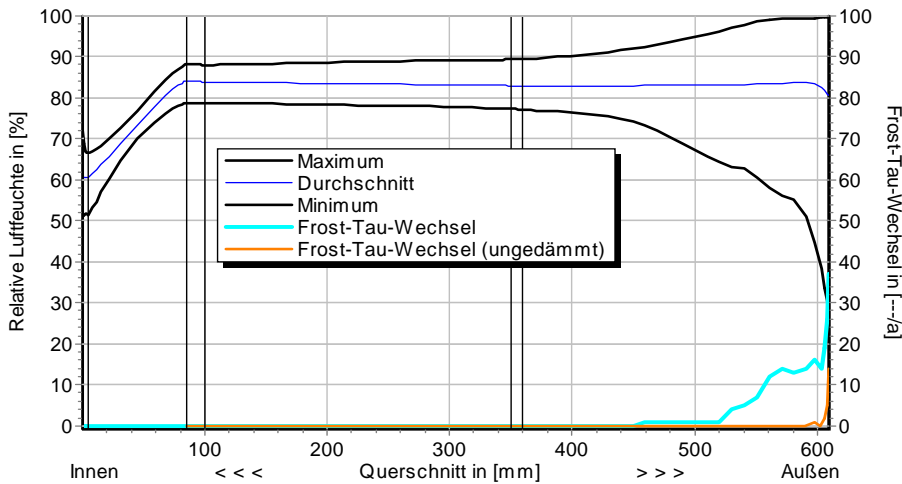
5.4 Feuchte- und Temperaturprofile



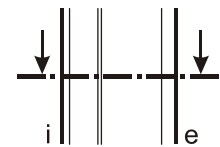
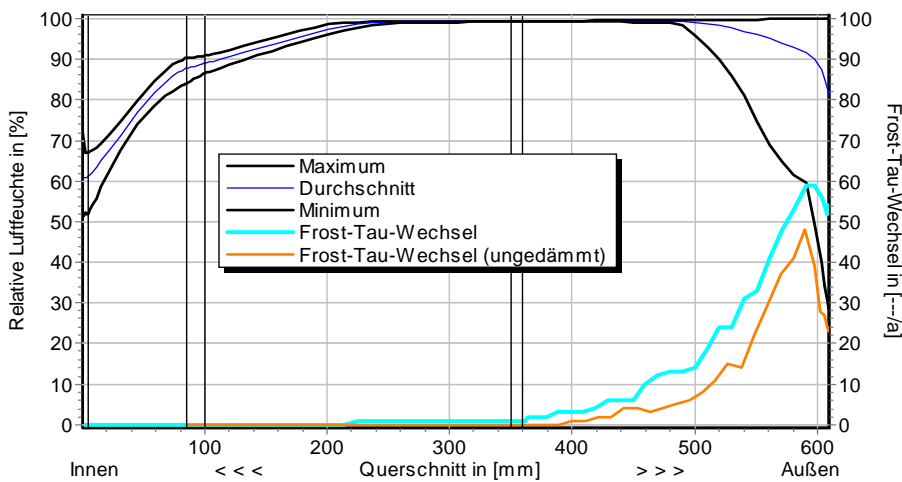
Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 80 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, ohne Schlagregen (Nord)

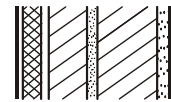


Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{Dä} = 80$ mm, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	17	30	34	37
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	89,1	88,9	88,7
	WL_w	%	100	110,7	114,6	118,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,3	97,5	97,6
	CIL_φ	%	100	96,8	95,8	95,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	42	57	60	63
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	89,8	89,5	89,3
	WL_w	%	100	107,5	109,6	110,8
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	97,8	97,6	97,4
	CIL_φ	%	100	99,1	98,6	97,9

11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz



6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✗	✗
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✗	✗	✗
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand $\varphi_{s}(\theta) < \text{LIM}$	○	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel $\varphi_{s}(\theta)_{Co} < \text{LIM}$	✗	✗	○	○

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsanier	40 mm	60 mm	80 mm
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

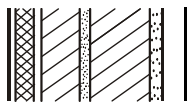
8 Schlussfolgerungen

- DIN: Ab 60 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz erfüllt, die maximal erlaubte Kondensatmenge wird nie überschritten.
- COND: Ab 60 mm Dämmung wird der Mindestwärmeschutz erfüllt, die maximal erlaubte Kondensatmenge wird nie überschritten.
- Simulation: Der Mindestwärmeschutz ist ab 0 mm Dämmung gegeben. Ohne Schlagregen werden die maximale innere Kondensatmenge und Verdunstung eingehalten. Bei hoher eindringender Schlagregenmenge ist mit keiner Dämmvariante die Verdunstung des Kondensats gewährleistet, der Grenzwert für Kondensat wird nur mit 40 mm Dämmung eingehalten. Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ist ab 60 mm Dämmung nur unter ungünstigeren Bedingungen zu erwarten.

Vorzugsvarianten: 60 bzw. 80 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

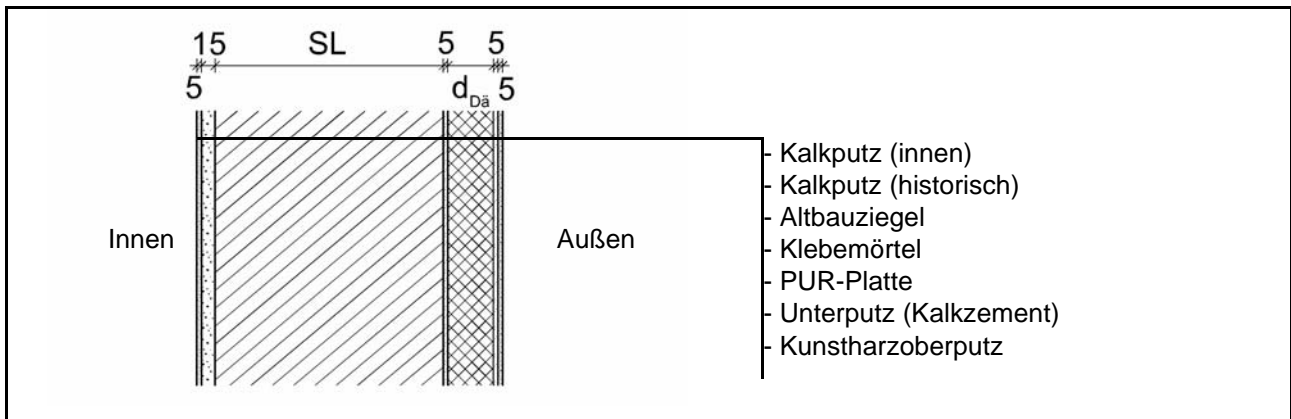
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen unverputzt: 1.7
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt: 2.1
- Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit feuchteadaptiver Dampfbremse, außen unverputzt: 2.2
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten: 3.3
- Altbauziegel, innen Holzweichfaserdämmplatten und Kunstharzoberputz, außen unverputzt: 3.4
- Altbauziegel, innen Holzwoleleichtbauplatten, außen unverputzt: 4.3
- Altbauziegel, innen mit Gipskarton verkleidete Luftschicht, außen unverputzt: 5.1
- Altbauziegel, innen Porenbetonsteine, außen unverputzt: 7.1
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen unverputzt: 8.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen unverputzt: 8.4
- Altbauziegel, innen PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung, außen hydrophobiert: 8.6
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehm, außen unverputzt: 10.3



12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System

1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht $d_{Dä} = 50, 80, 120$ mm

1 SL = 1 Steinlänge (250 mm), 1½ bzw. 2 SL = 120 mm + 10 mm Mörtel + 120 bzw. 250 mm Ziegel

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² ·s ^{0,5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Kalkputz (historisch)	1797	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1714	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1568	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Klebemörtel	1500	0,94	30	7,5	24,8	0,011
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
Unterputz (Kalkzementputz)	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033
Kunstharzoberputz	1100	0,70	350	1,0	11,1	0,002

2.1 Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsanieret, 1SL	50mm, 1SL	80mm, 1½SL	120mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W	0,36	2,1	3,38	4,97
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/m ² ·K	1,90	0,43	0,28	0,20
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,079	0,042	0,021
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,414	0,385	0,369
Temperaturfaktor* (G.-Winkel)	f_{Rsi}	-	0,462	0,799	0,849	0,886

* mit $R_{Si} = 0,25$ m²·K/W und $\theta_e = -5^\circ\text{C}$

2.2 Ergebnisse nach COND

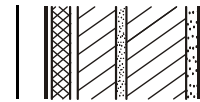
	Symbol	Einheit	Unsanieret, 1SL	50mm, 1SL	80mm, 1½SL	120mm, 2SL
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m ² ·K/W	0,36	2,1	3,38	4,97
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m ² ·K	1,90	0,43	0,28	0,20
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m ²	-	0,061	0,028	0,008
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m ²	-	0,414	0,385	0,369
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	55,5	53,5	52,4

Innendämmsystem:

** feuchteabhängig

s_d -Wert	s_{di}	m	-	-	-	-
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m ² ·K/W	-	-	-	-
Wirk. Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K·m ²	46,8	46,7	46,7	46,7

12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System



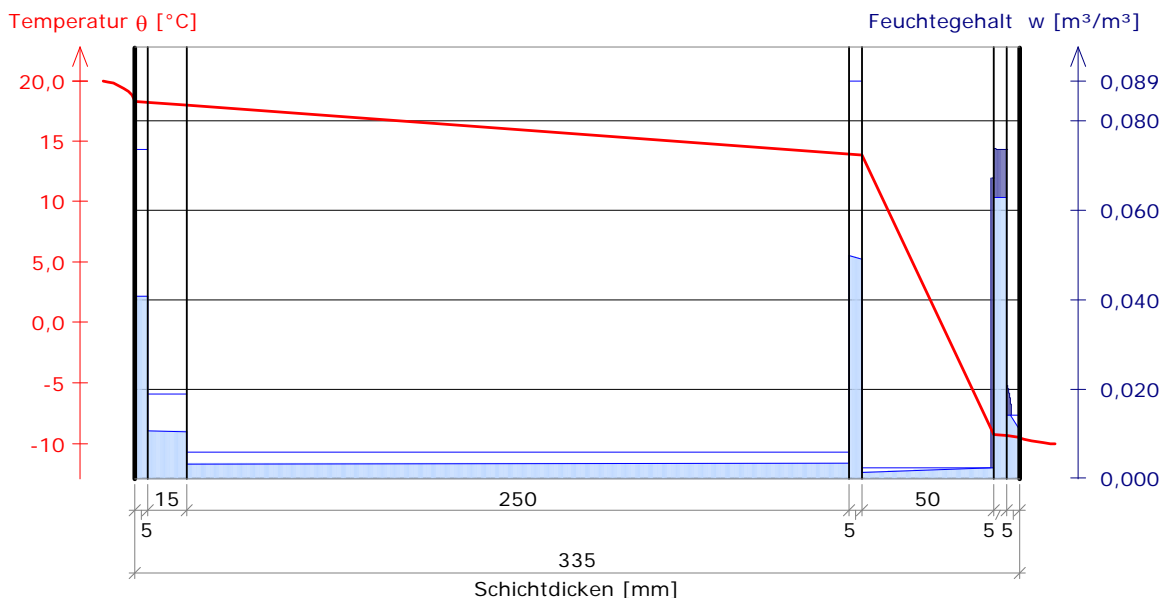
3 Nachweise unter stationären Bedingungen

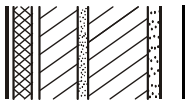
	Bedingung	Unsanier, 1SL		50mm, 1SL		80mm, 1½SL		120mm, 2SL	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 Tabellarische und grafische Darstellung nach COND

Für $d_{\text{Dämmung}} = 50 \text{ mm}$ und einer Steinlänge (1 SL)

Schicht/Material	θ [°C]	P_{sat} [Pa]	P [Pa]	w [m³/m³]	d_c [mm]	M_c [kg/m²]
Luftschicht (Warmseite)	20,0	2338	1169			
1 Kalkputz (innen)	18,3	2105	1169	0,041		
	2 Kalkputz (historisch)	18,2	2094	1163	0,041	
3 Altbauziegel		18,0	2063	1141	0,011	
	4 Klebemörtel	13,9	1593	893	0,003	
5 PUR-Platte		13,9	1586	875	0,003	
	6 Kalkzementputz	-9,3	276	276	0,050	0,0
7 Kunstharzoberputz		-9,4	274	274	0,049	
	Luftschicht (Kaltseite)	-9,5	272	208	0,001	
		-10	260	208	0,067	5,0
				0,074	1,6	0,01
				0,021		
				0,011		





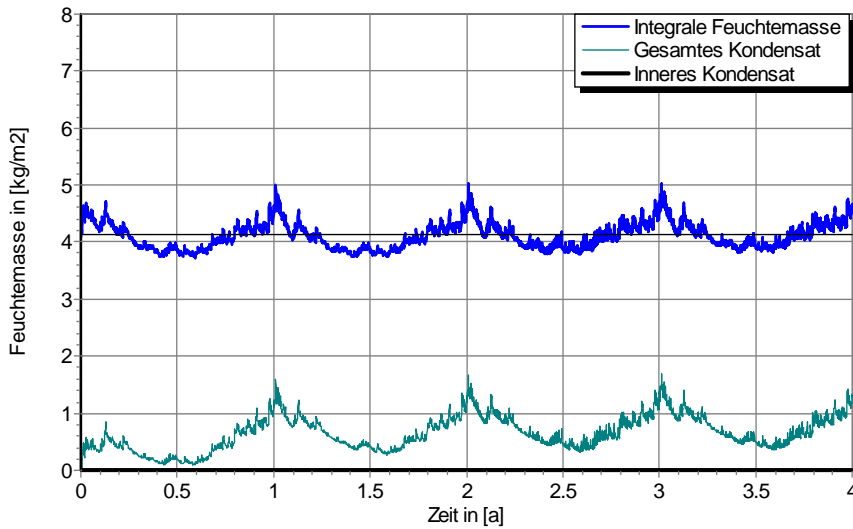
12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System

5 Simulationsergebnisse

Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



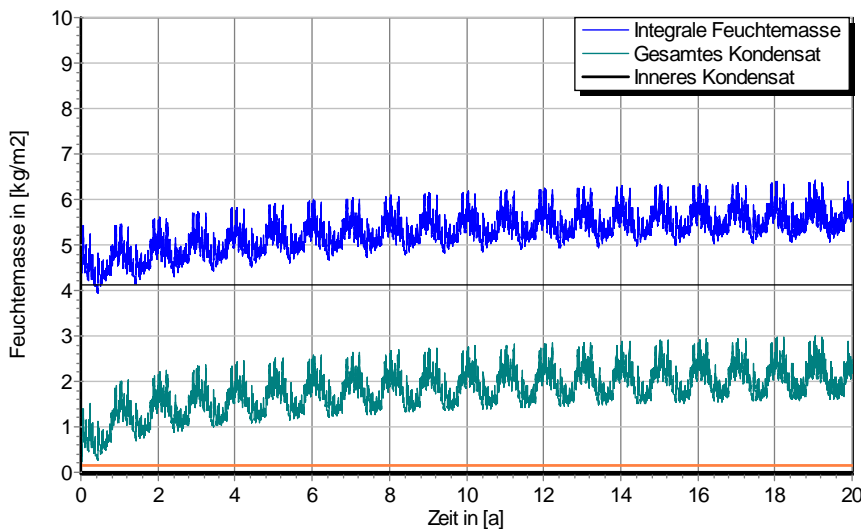
5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen



$\Delta m_{W,80}$

Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 120 \text{ mm}$ und 2 SL,
 ohne Schlagregen

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	50 mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	0,727	0,630	0,717	0,903
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	-	0,0	0,0	0,0

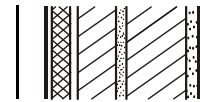


$\Delta m_{W,80}$

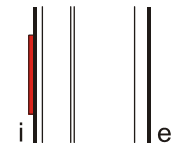
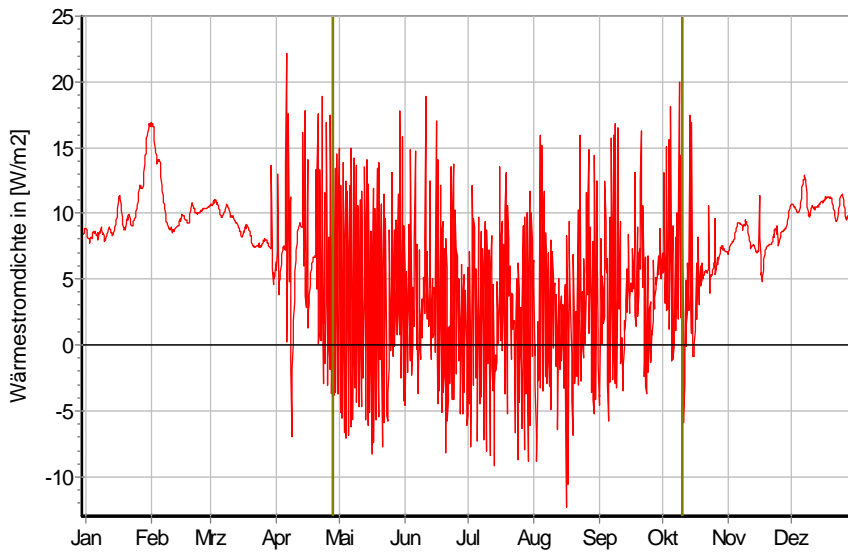
Wassermassen für
 $d_{D\ddot{a}} = 120 \text{ mm}$ und 2 SL,
 schlagregenexponiert,
 maximales inneres
 Kondensat der unsanierten
 Variante (1 SL) in orange

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniert,1SL	50 mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m ²	6,701	1,562	1,736	2,292
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m ²	0,141	0,0	0,0	0,0

12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System



5.2 Instationäre Wärmeverluste

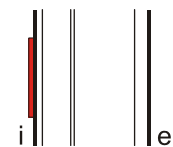
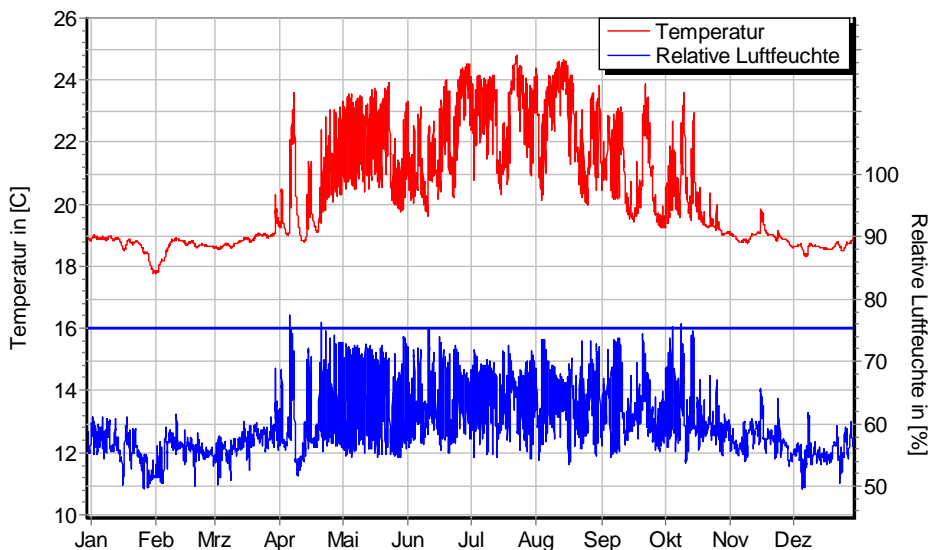


Wärmestromdichte über Innenwandoberfläche für $d_{Dä} = 50 \text{ mm}$ (1 SL), ohne Schlagregen (Nord) Heizperiode vom 8. Oktober bis 29. April (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

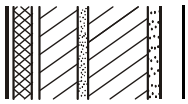
Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	50 mm, 1 SL	80 mm, 1½ SL	120 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	8,64	5,61	3,88
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	0,49	0,32	0,22
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,33	1,86	2,96	4,36

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsanirt, 1 SL	50 mm, 1 SL	80 mm, 1½ SL	120 mm, 2 SL
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,45	8,80	5,75	4,00
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,96	0,50	0,33	0,23
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	1,83	2,89	4,22

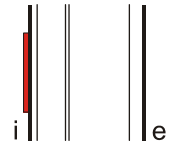
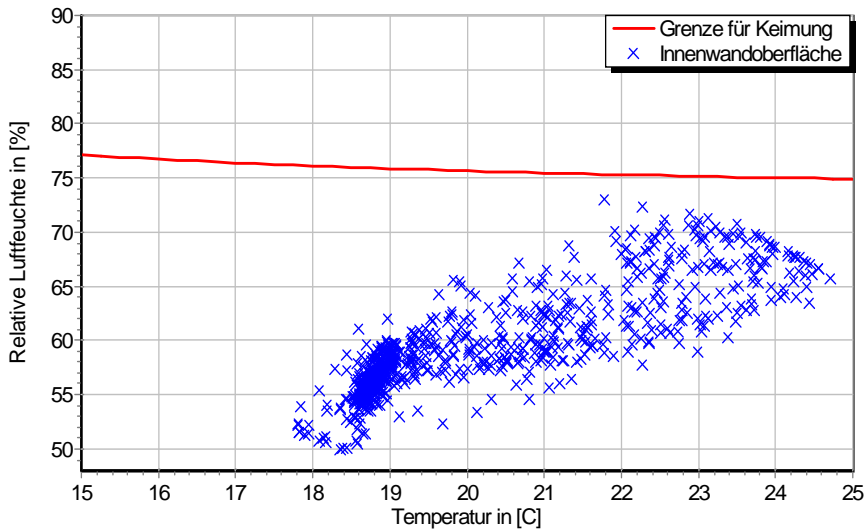
5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche



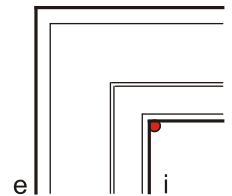
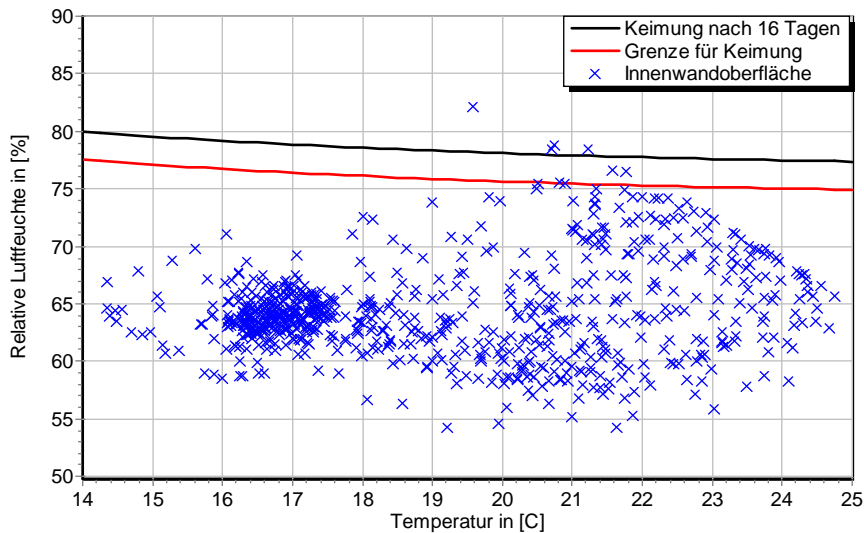
Temperatur- und Luftfeuchteverlauf für $d_{Dä} = 50 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System

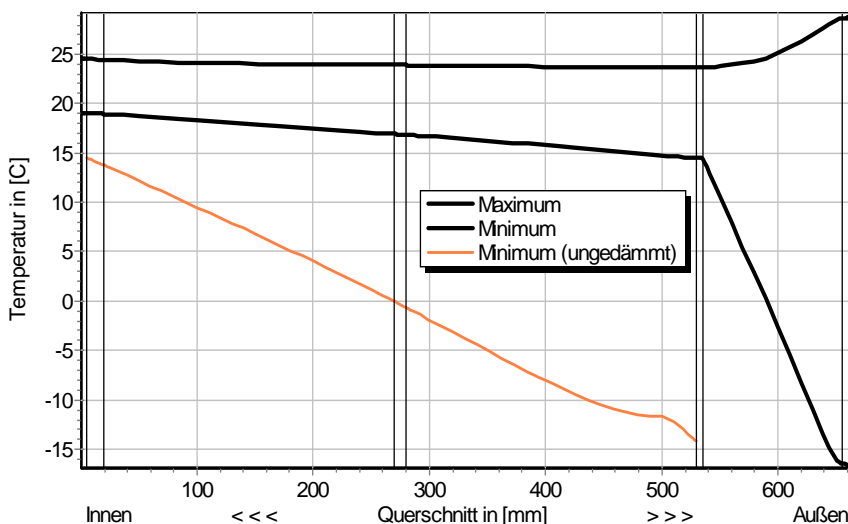


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte auf der Wandoberfläche. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$ und 1 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)



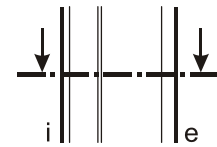
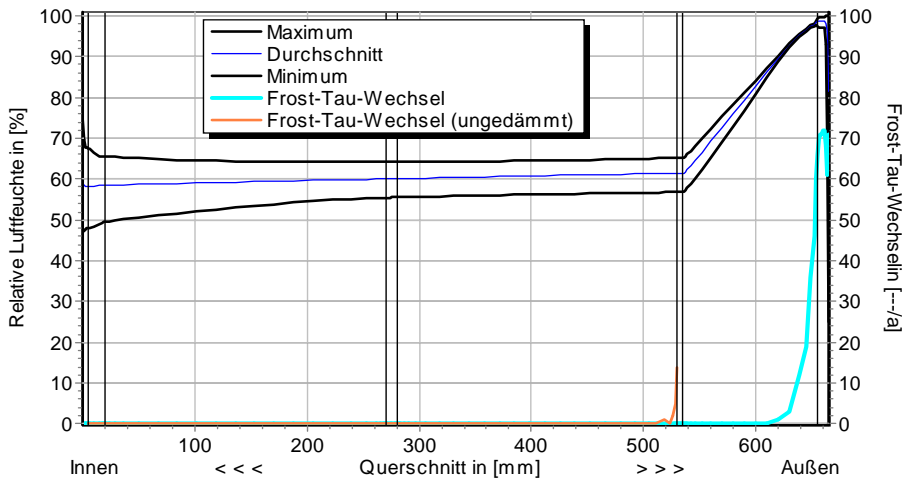
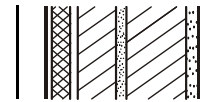
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Gebäudewinkel. Isoleth für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$ und 1 SL, Nordwestwinkel mit Schlagregen.

5.4 Feuchte- und Temperaturprofile

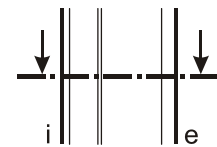
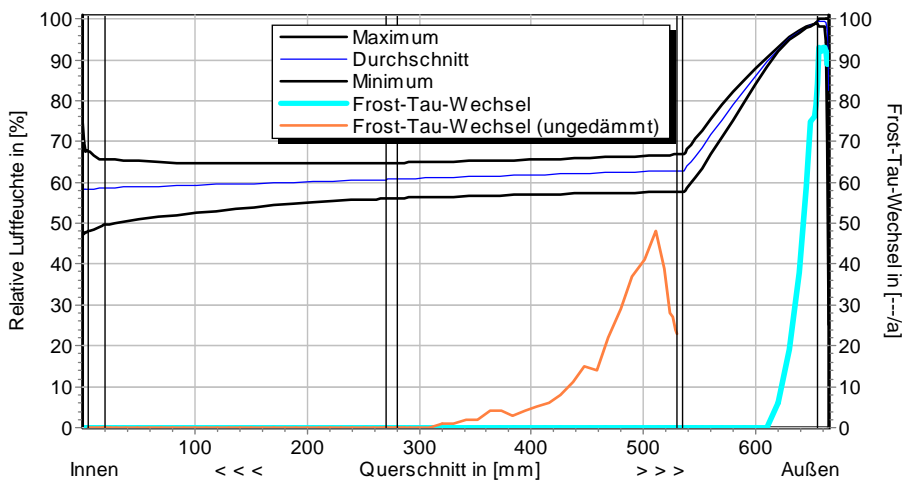


Temperaturprofile mit und ohne Innendämmung, $d_{D\ddot{a}} = 120 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord) (Verlauf mit Schlagregen sehr ähnlich)

12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System



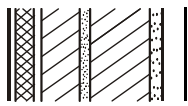
Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 120 \text{ mm}$ und 2 SL, ohne Schlagregen (Nord)



Luftfeuchteprofile und Frost-Tau-Wechsel für $d_{D\ddot{a}} = 120 \text{ mm}$ und 2 SL, schlagregenexponiert (West)

5.5 Belastungskennzahlen 6.02 14:59

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	50mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	1	70	78	81
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	114,8	115,8	115,7
	WL_w	%	100	106,8	110,1	117,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	102,8	101,8	99,6
	CIL_φ	%	100	136,8	138,0	138,2
Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Uns.,1SL	50mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingwachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	21	92	98	102
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_0	%	100	115,6	116,0	117,7
	WL_w	%	100	217,8	216,7	211,2
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_0	%	100	88,9	93,7	99,4
	CIL_φ	%	100	162,5	154,0	150,9



12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ohne Schlagregen (Nord)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	50mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)	Bedingung	Unsaniiert,1SL	50mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,v}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz - Wand	$\varphi_{s,i}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
- Nordwestwinkel	$\varphi_{s,i}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert,1SL	50mm,1SL	80mm,1½SL	120mm,2SL
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
Simulation - ohne Schlagregen	■	■	■	■
Simulation - schlagregenexponiert	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

DIN/COND: Alle Dämmvarianten erfüllen die Kriterien.

Simulation: Alle Dämmvarianten, auch mit Schlagregenexponierung, erfüllen die Kriterien.

Schimmelwachstum/Feuchteschäden sind nur unter ungünstigeren Nutzungsbedingungen zu befürchten.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 120 mm Dämmdicke.

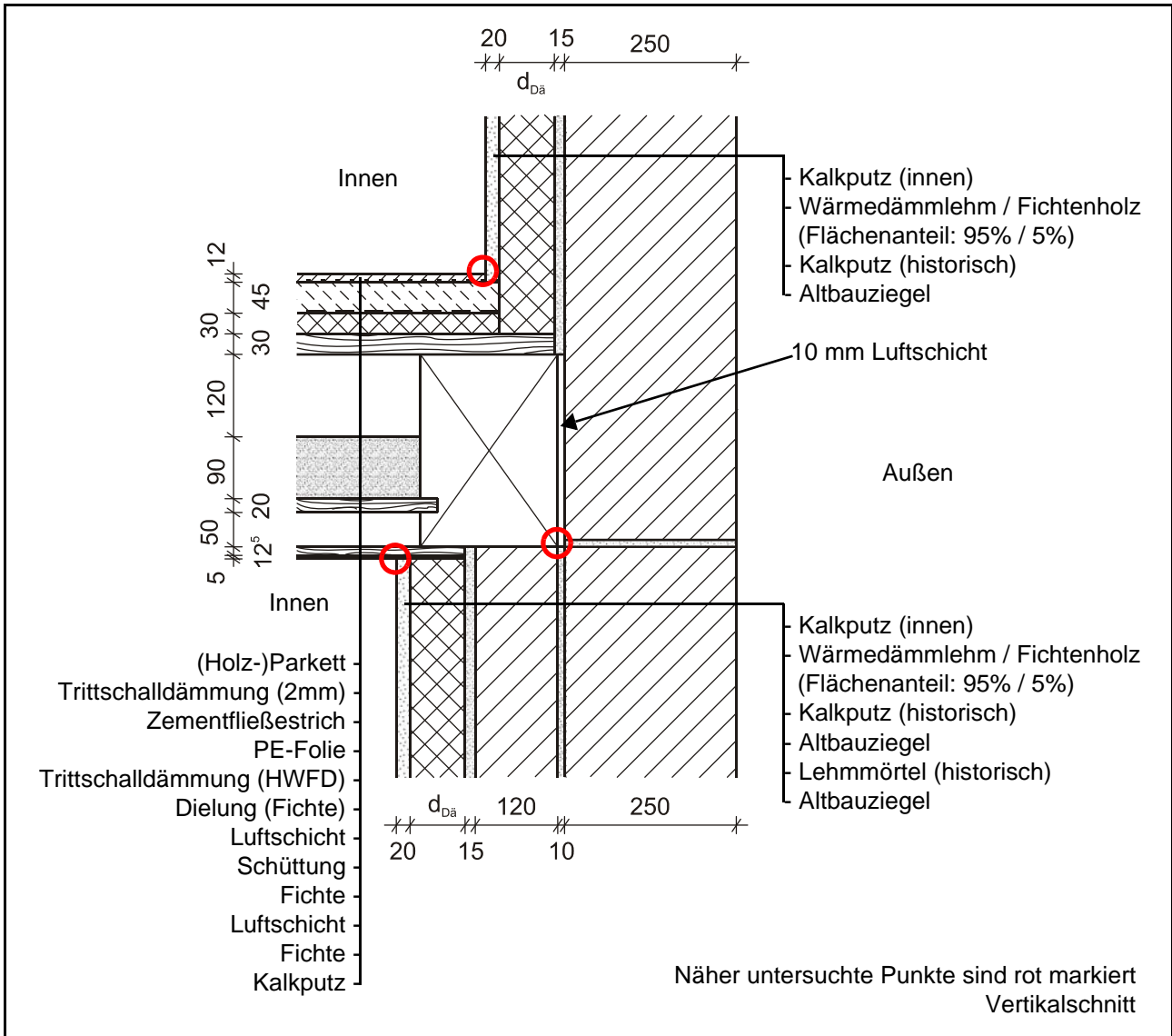
Ähnliche Konstruktionen:

- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten: 1.1 bis 1.3
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen mit historischem Kalkputz: 1.4
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Kunstharzputz: 1.5
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten, außen zusätzlich mit Wärmedämmputz: 1.6
- Altbauziegel, innen Calciumsilikatplatten nur punktuell verklebt: 1.8
- Altbauziegel, innen Mineralfaserplatten: 6.1 bis 6.3
- Altbauziegel, innen PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz: 8.5
- Altbauziegel, innen Schaumglasplatten: 9.1 bis 9.3
- Altbauziegel, innen Wärmedämmlehmplatten: 10.4 bis 10.6

13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

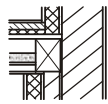


1 Konstruktions- und Materialdaten



Varianten: Dicke der Dämmschicht (jeweils oben und unten gleiche Dicke) $d_{D\ddot{a}}$ = 50, 80 und 100 mm

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m ³	W/m·K	-	Vol%	Vol%	kg/m ² s ^{0.5}
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Wärmedämmlehm (MW)	460	0,080	19,8	2,8	58,5	0,008
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Zementfließestrich	2060	1,49	25	1,7	25,3	0,081
Schüttung	2650	0,70	6	15,7	37,0	0,109
PE - Folie	940	0,2	100000	< 0,001	< 0,001	-
Trittschalldämmung (HWFD-Platte)	155	0,042	3	1,8	60,0	0,074



13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

2 Nachweise unter stationären Bedingungen für die anliegenden, eindimensionalen Wandaufbauten

2.1 Eindimensionale Wand - Unteres Geschoss mit Dicke Wandbildner 250 mm (10.1)

	Bedingung	Unsaniiert		50 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓

3.2 Eindimensionale Wand - Oberes Geschoss mit Dicke Wandbildner 380 mm (10.2)

	Bedingung	Unsaniiert		50 mm		80 mm		100 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7 /$ $\varphi_{si} \leq 60\% \text{ (COND)}$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓

Weitere bzw. detailliertere Ergebnisse oder grafische Darstellungen in den angegebenen Abschnitten.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus 10.1 und 10.2

	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
DIN 4108	✗	✗	✓	✓
COND	✗	✗	✓	✓
Simulation - ohne Schlagregen	✗	✗	✓	✓
Simulation - schlagregenexponiert	✗	✗	✓	✓

13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

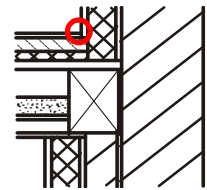
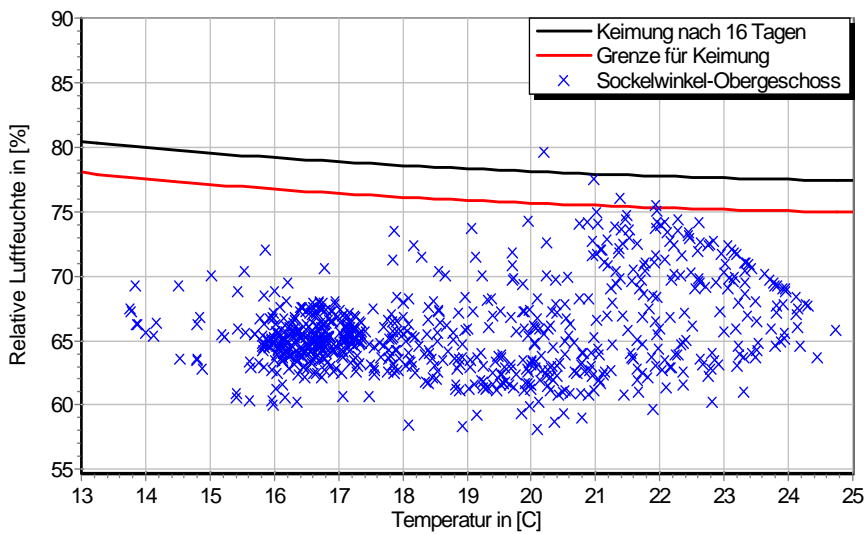


5 Simulationsergebnisse

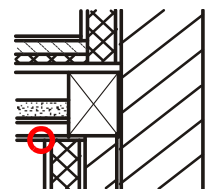
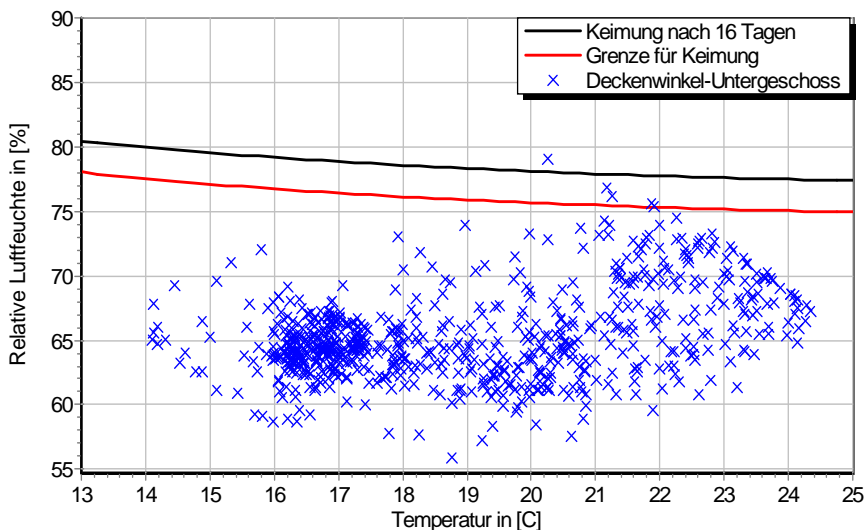
Klimazone: Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
 TRY-Region 5
 Referenzstandort: Passau



5.1 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

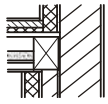


Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Bodenwinkel des Obergeschoss'-
 Isoplethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)



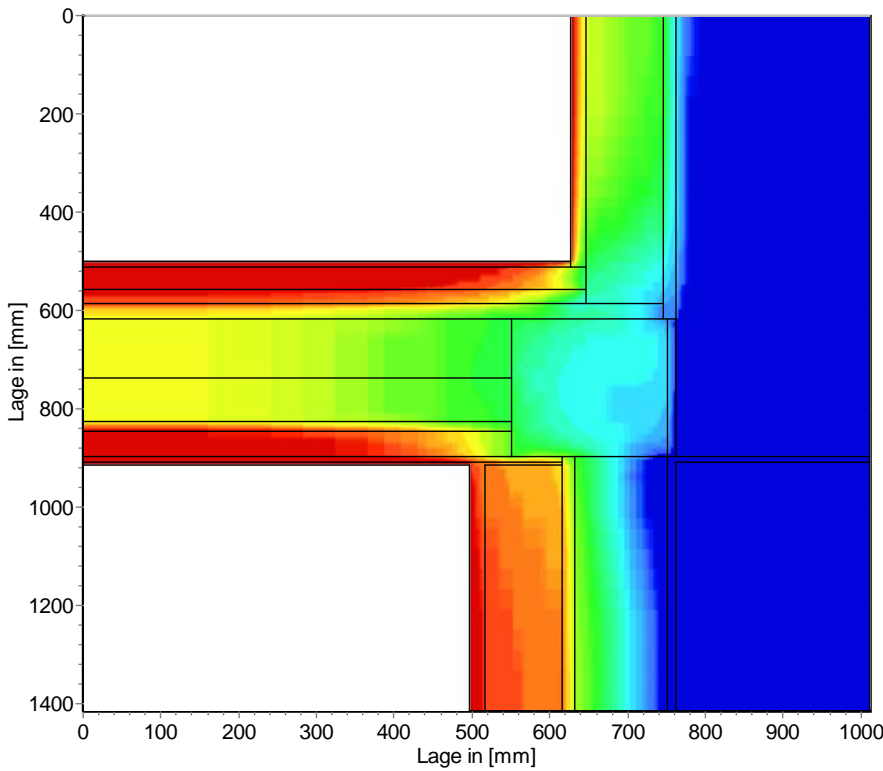
Jahreszyklus von Temperatur und Luftfeuchte im Deckenwinkel des Untergeschoss'-
 Isoplethen für Keimung von Schimmelpilzen auf gut verwertbarem Substrat, $d_{D\ddot{a}} = 50 \text{ mm}$, ohne Schlagregen (Nord)

(Verlauf mit Schlagregen jeweils sehr ähnlich)

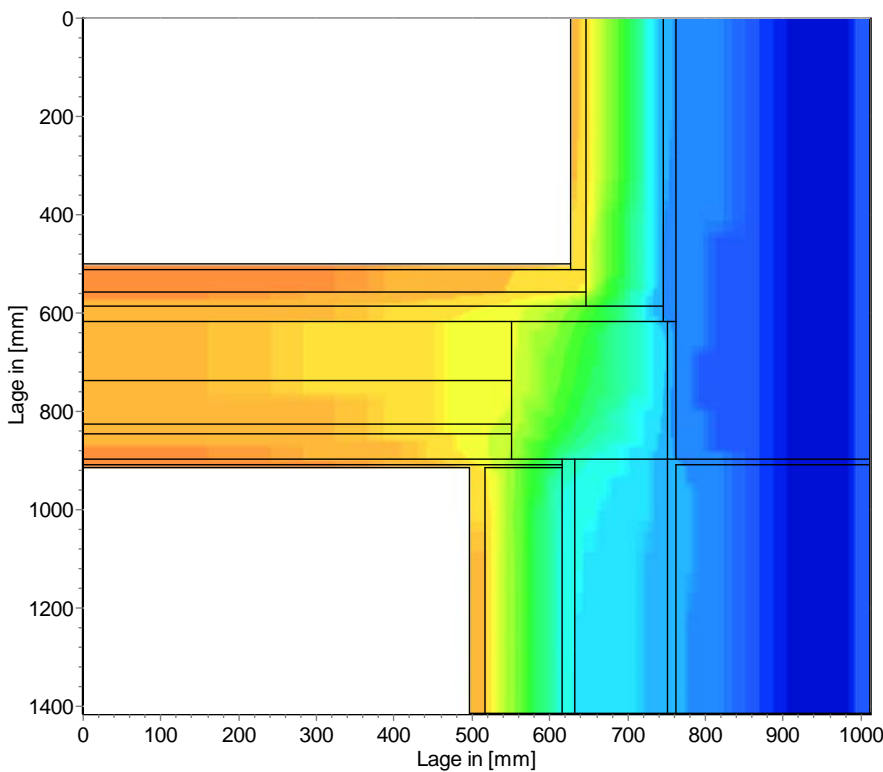
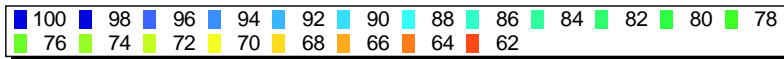


13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

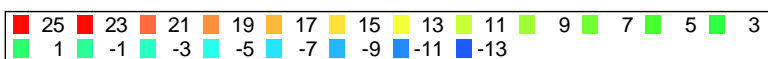
5.2 Felder der relativen Luftfeuchte und der Temperatur



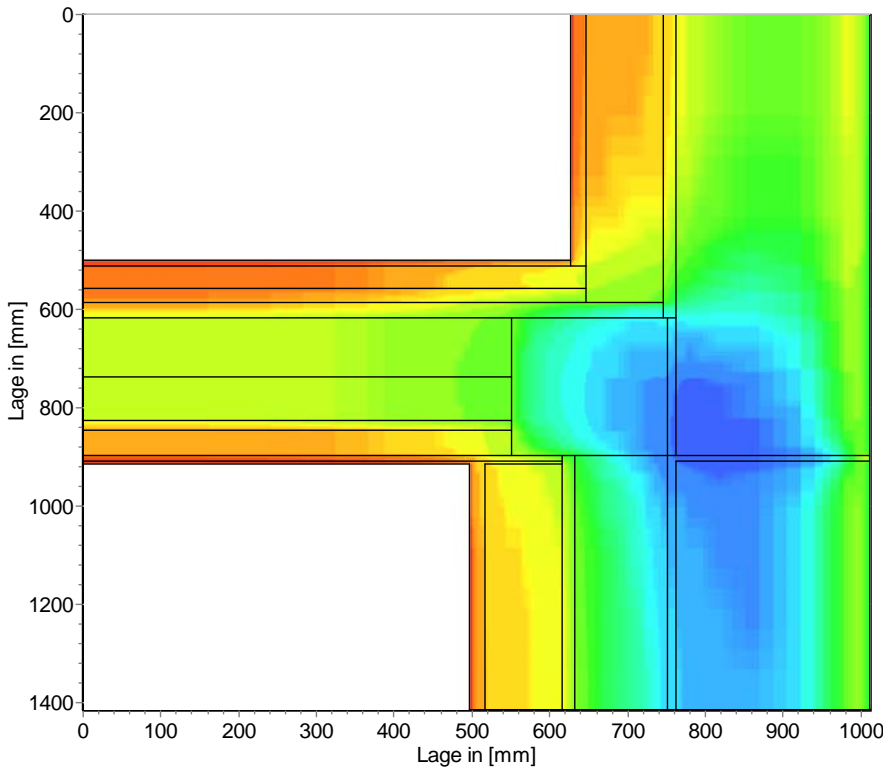
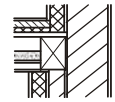
Relative Luftfeuchte - nass:
Verteilung der Luftfeuchte
am 23. März mit
 $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
mit Schlagregen (West)



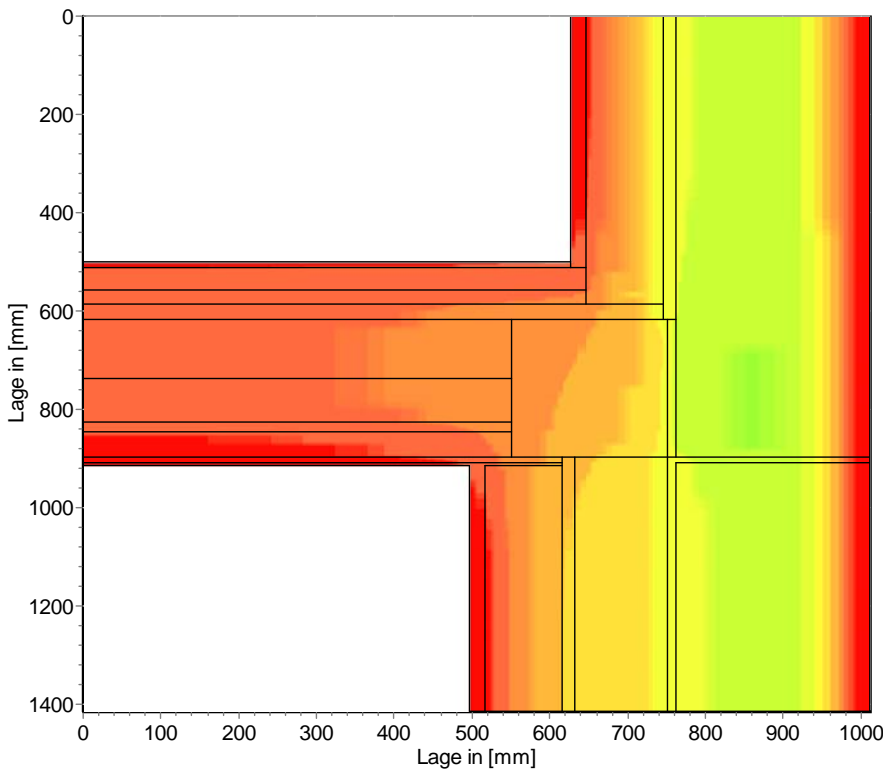
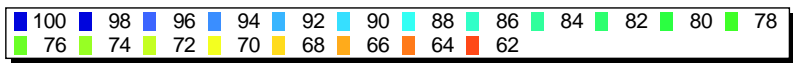
Temperatur - kalt:
Temperaturverteilung
am 2. Februar mit
 $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
ohne Schlagregen (Nord)



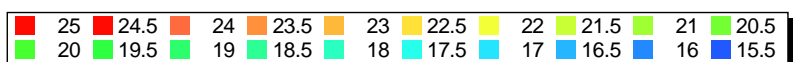
13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

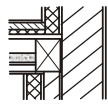


Relative Luftfeuchte - trocken:
Verteilung der Luftfeuchte
am 12. September mit
 $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
mit Schlagregen (West)



Temperatur - warm:
Temperaturverteilung am
15. August mit
 $d_{D\ddot{a}} = 100 \text{ mm}$,
ohne Schlagregen (Nord,
Temperaturskala stimmt nicht
mit vorangegangener überein)





13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm

5.3 Belastungskennzahlen (auf der Höhe des Streichbalkens)

Ohne Schlagregen (Nord)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	0/0	0/0	0/0	0/0
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	4	34	37	39
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	101,0	100,8	100,6
	WL_w	%	100	112,9	116,4	118,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	100,0	100,1	100,3
	CIL_{φ}	%	100	219,5	216,3	215,1

Schlagregenexponiert (West)	Symbol	Einheit	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/\max}$	d	178/174	259/147	303/178	320/241
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche ($\varphi_{se} > 98\%$)	$t_{cond,e}$	d	13	59	61	62
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_{θ}	%	100	100,8	100,7	100,5
	WL_w	%	100	110,1	112,4	113,4
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_{θ}	%	100	97,9	97,6	97,7
	CIL_{φ}	%	100	250,8	249,4	248,7

*Alle Kennzahlen bzgl. möglichen Schädlingswachstums beziehen sich auf die höher belastete, untere Außenecke des Streichbalkens (s. Konstruktionsskizze)

6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Bedingung	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm	
Vermeidung Schimmelpilz (ohne Schlagregen)	$\varphi_{s}(\theta) < LIM$	✗	○	○	✓
Vermeidung Schimmelpilz (mit Schlagregen)	$\varphi_{s}(\theta) < LIM$	✗	○	○	✓

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Unsaniiert	50 mm	80 mm	100 mm
Eindimensionale Berechnungen	■	■	■	■
Zweidimensionale Berechnungen	■	■	■	■

8 Schlussfolgerungen

Gemäß den Ergebnissen aus den eindimensionalen Berechnungen muss die Mindestdicke der Dämmung 80 mm betragen.

Aus der Untersuchung des zweidimensionalen Details ergibt sich bei keiner gedämmten Variante eine Gefährdung auf der Wandoberfläche. Nur bei großen eindringenden Schlagregensmengen steigt mit der Dämmdicke die Wahrscheinlichkeit von Schädlingswachstum deutlich an, weshalb für diesen Fall mit nicht mehr als 80 mm gedämmt werden sollte.

Vorzugsvarianten: 80 bzw. 100 mm Dämmdicke (Schlagregensicherheit überprüfen).

III Anhang



A Abkürzungsverzeichnis

Liste mit lateinischen Symbolen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	m ²	Fläche
A _W	kg/m ² h ^{0,5}	Wasseraufnahmekoeffizient
c	J/kgK	spezifische Wärmespeicherkapazität
C	J/kgK	Wärmespeicherkapazität
C _R	-	Geländeerhöhungsfaktor
C _T	-	Topographiefaktor
C _{wirk}	J/kgK	Wirksame Wärmespeicherkapazität
d	m	Dicke
D	°	Stundenmittel der Windrichtung
D _l	m ² /s	Diffusionskoeffizient für Flüssigwasser
D _v	m ² /s	Diffusionskoeffizient für Wasserdampf im Material
D _{v,air}	m ² /s	Diffusionskoeffizient für Wasserdampf in Luft
f _{Rsi}	-	Temperaturfaktor
g _k	m/s ²	Gravitationskonstante in k-Richtung
g _l	kg/m ² h	Flüssigwasserdiffusionsstromdichte
g _v	kg/m ² h	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
h	m	Höhe
h	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
I _A	l/m ² a	Jährlicher Windfeldindex
I _{WA}	l/m ² a	Jährlicher Wandindex
$\dot{J}_{k,conv}^{m_l}$	kg/m ² s	Konvektiver Flüssigwassertransport in
$\dot{J}_{k,diff}^{m_v}$	kg/m ² s	Diffusiver Wasserdampftransport in
$\dot{J}_{k,diff}^{m_g}$	kg/m ² s	Konvektiver Lufttransport in k-Richtung
$\dot{J}_{k,conv}^Q$	kg/m ² s	Diffusiver Wärmetransport in k-Richtung
k	-	Anstieg Flüssigwasserleitfähigkeit (COND)
k _w	-	Anpassungsparameter (DELPHIN)
K _{cap}	s	Leitfähigkeit bei kapillarer Sättigung
K _g	s	Gaspermeabilität
K _l	s	Flüssigwasserleitfähigkeit
m _v	kg/m ²	Feuchtemenge in gasförmiger Form
m _{W,T}	kg/m ²	Tauwassermenge
m _{W,V}	kg/m ²	Verdunstungsmenge
N	-	Modalität
N	-	Anzahl der Jahre (<i>prEN ISO 15927-3</i>)
O	-	Hindernisfaktor
p _c	Pa	Kapillardruck



pC	log(Pa)	Logarithmischer Kapillardruck $p_C = \log(-p_c)$
p _l	Pa	Partialdruck der Flüssigphase
p _{sat}	Pa	Sättigungsdampfdruck
p _v	Pa	Wasserdampfpartialdruck
q	W/m ²	Wärmestromdichte
r	mm	Stündliche Gesamtniederschlagsmenge
R	m ² K/W	Wärmedurchlasswiderstand
R	m	Äquivalenter Porenradius (DELPHIN)
R _e	m ² K/W	Äußerer Wärmeübergangswiderstand
R _i	m ² K/W	Innerer Wärmeübergangswiderstand
R _{ID}	m ² K/W	Wärmewiderstand des Innendämmsystems
R _{inst,HP}	W/m ² K	Instationärer R-Wert während der Kondensationsperiode
R _{min}	m ² K/W	Mindestwärmeschutz
R _k	-	Formparameter für Feuchtespeicherfunktion (DELPHIN)
R _T	m ² K/W	Wärmedurchgangswiderstand
R _v	J/kgK	Spezifische Gaskonstante in Wasserdampf
s _d	m	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
s _{d,ID}	m	s _d -Wert des Innendämmsystems
S _k	-	Formparameter für Feuchtespeicherfunktion (DELPHIN)
t	s	Zeit, Zeitdauer
t _{cond,e}	s	Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche
t _T	s	Dauer der Kondensationsperiode
t _v	s	Dauer der Verdunstungsperiode
T	°C	Temperatur (DELPHIN-Modellierung)
U	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient
U _{inst,HP}	W/m ² K	Instationärer U-Wert während der Kondensationsperiode
v	m/s	(Wind-)Geschwindigkeit
w	m ³ /m ³	Wassergehalt
w ₈₀	m ³ /m ³	Wassergehalt bei 80% relativer Luftfeuchte
w _{eff}	m ³ /m ³	Wassergehalt bei effektiver Sättigung
W	kg/m ²	Kondensatmenge
W	-	Wandfaktor (<i>prEN ISO 15927-3</i>)
W _k	-	Formparameter
W _w	kg/m ² h ^{0,5}	Wasseraufnahmekoeffizient
x	m	Wegkoordinate



A Abkürzungsverzeichnis

Liste mit griechischen Symbolen

Symbol	Einheit	Beschreibung
β	°	Neigung
Δ	-	Differenz
δ_{air}		Dampfleitfähigkeit von Luft
φ	%	Relative Luftfeuchte
φ_{co}	%	Relative Luftfeuchte im Gebäudewinkel
φ_{si}	%	Relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ_{R}	W/mK	Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit
ψ	W/mK	Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient
μ	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor
ρ	kg/m ³	Rohdichte
ρ_{w}	kg/m ³	Rohdichte des Wassers
σ_{l}	N/mm ²	Oberflächenspannung des Wassers
θ	-	Formparameter bei Materialmodellierung
θ	°C	Celsius-Temperatur
θ_{cap}	m ³ /m ³	Wassergehalt bei kapillarer Sättigung (DELPHIN-Modellierung)
θ_{co}	°C	Temperatur im Gebäudewinkel
θ_{e}	°C	Außentemperatur
θ_{eff}	m ³ /m ³	Wassergehalt bei effektiver Sättigung (DELPHIN-Modellierung)
θ_{i}	°C	Raumtemperatur
θ_{l}	m ³ /m ³	Volumetrischer Wassergehalt (DELPHIN-Modellierung)
θ_{si}	°C	Temperatur an der Innenoberfläche
Θ	°	Winkel zwischen Norden und Wandnorma-

Liste der verwendeten Indizes

Symbol	Beschreibung
air	Luft (engl.: air)
cap	Wert bei kapillarer Sättigung (engl.: capillary)
co	(Gebäude-)Winkel (engl.: corner)
cond	kondensiert (engl.: condensed)
conv	konvektiv (engl.: convective)
Dä	Dämmung
diff	diffusiv
dry	trockener Wert, trocken (engl.: dry)
e	extern



eff	Wert bei effektiver Sättigung
g	Gasphase, gasförmig
HP	Heizperiode
i	intern
inst	instationär
int	intern
ID	Innendämmung
k	Zählindex
l	Flüssigphase, flüssig (engl.: liquid)
max	Maximum
min	Minimum
R	Rechenwert
rel	relativ
s	Oberfläche (engl.: surface)
sat	Sättigung (engl.: saturated)
T	Tauperiode
v	dampfförmig (engl.: vaporous)
V	Verdunstung
W	Kondensatmenge
wirk	wirksam
x	Laufvariable

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
CIL	Crack Inducted Load, dt.: Rissinduktionsbelastung
FTC	Freeze Thaw Cycles, dt.: Frost-Tauwechsel
LIM	Lowest Isopleth for Mould, dt.: Unterste Grenze für Schimmelpilzwachstum
PGV	Possible Growth of Vermins, dt.: mögliches Schädlingswachstum
PVV	Porenvolumenverteilung
WL	Weathering Load, dt.: Witterungsbelastung



Autoren

- Ahnert, R. & Krause, K. H.: „Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1: Gründungen, Abdichtungen, Tregende, massive Wände, Gesimse, Schornsteine“ Verlag für Bauwesen, Berlin 2000
- Bear, J. & Bachmat, Y.: „Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media“ Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1991
- Blocken, B. & Carmeliet, J.: „Parameters determining the time resolution of wind-driven rain calculations“ 12th International Symposium for Building Physics, Proceedings Vol.1, S. 609-616, TU Dresden 2007
- Blocken, B.: „Wind-driven rain on buildings – measurements, numerical modelling and applications“ PhD-thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Laboratory of Building Physics, May 2004
- Burdine, N. T.: „Relative Permeability calculations from pore-size distribution data“ Trans. AIME 198: S. 71-78, 1953
- Cameliet, J. & Roels, S.: „Determination of isothermal moisture transport properties of porous building material“ Journal of Thermal envelope and building Science (2001) Vol 24: S. 183-210
- Christoffer, J., Deutschländer, T., Webs, M.: „Testreferenzjahre für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY“ Offenbach a. Main: Selbstverlag des Deutscher Wetterdienstes, 2004
- Cohen S. D. & Hindmarsh A. C.: „CVODE, A Stiff/Nonstiff ODE Solver“ C. Computers in Physics, vol. 10, no. 2, S. 138-143, 1996
- Cziesielski, E.: „Schimmelpilz – Ein komplexes Thema“ Vortrag auf der Veranstaltung Energiesparendes Bauen – neue Dimensionen für nachhaltiges Wirtschaften des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, Berlin 29.04.1999
- Colling, F.: „Lernen aus Schäden im Holzbau: Ursachen, Vermeidung, Beispiele“ Bruderverlag: Karlsruhe, Fraunhofer IRB-Verlag: Stuttgart, DGfH Innovations- und Service GmbH: München 2000
- Erhorn, H., Szerman, M., Rath, J.: „Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwändecken von Wohnbauten“ Bauforschungsbericht F 2110, Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart, 1988
- Fischer, H.-M., Jenisch, R., Stohrer, M., Hohmann, M., Freymuth, H., Richter, E., Häupl, P.: „Lehrbuch der Bauphysik – Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima“ 6. Auflage, Vieweg+Teubner-Verlag: Wiesbaden 2008
- Fitz, C., Hofbauer, W., Sedlbauer, K., Krus, M., Breuer, K.: „Prognoseverfahren zum biologischen Befall durch Algen, Pilze und Flechten an Bauteiloberflächen auf Basis bauphysikalischer und mikrobieller Untersuchungen Bauforschung für die Praxis“ Band 77 Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart 2007



- Funk, M.: „Hysteresis der Feuchtespeicherung in kapillarporösen Baustoffen“ Dissertation, TU Dresden 2009
- Gnoth, S.: „Zum thermischen und hygri-schen Verhalten von Bauteilen mit offenen und geschlossenen Hohlräumen“ Dissertation, TU Dresden voraussichtlich Ende 2007
- Grunewald, J.: „Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen“ Dissertation, TU Dresden, 1997
- Grunewald, J., Funk, M., Scheffler, G., Sladek, V., Sladek, J.: „Workpackage reports 1 bis 5 des EU-Projekts GRD1-1999-11149: Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation - INSUMAT“ Eigenverlag der TU Dresden 2004
- Grunewald, J. & Häupl, P.: „Ein Modell zur Beschreibung der feuchteabhängigen Dampfleitfähigkeit kapillarporöser Materialien“ Tagungsband zum 11. Bauklimatisches Symposium an der TU Dresden, Sept. 2002, S. 286 - 294
- Grunewald, J. & Häupl, P.: „Gekoppelter Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in porösen Baustoffen“ – Bauphysikkalender 2003 (S. 377-434), Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003
- GRUNEWALD, J. & NICOLAI, A.: „Effekte der Luftströmung auf das hydrothermische Verhalten von leichten Umfassungskonstruktionen“ Bauphysik, (1): S. 48–54, 2007.
- Glaser, H.: „Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen“ In: Kältetechnik Heft 11 (1959), S. 345 bis 349
- Häupl, P.: „COND 2002 – ein einfaches Modell und Programm zum gekoppelten Wasserdampf- und Kapillarwassertransport in Umfassungskonstruktionen – Teil 1 Grundlagen“ wksb 53 (2005) S. 25-36, ISSN 0341-0293
- Häupl, P.: „COND 2002 – ein einfaches Modell und Programm zum gekoppelten Wasserdampf- und Kapillarwassertransport in Umfassungskonstruktionen – Teil 2 Anwendungen“ wksb 54 (2005) S. 32-39, ISSN 0341-0293
- Häupl, P., Stopp, H., Strangfeld, P.: „Feuchtebestimmung in Umfassungskonstruktionen mit dem Bürocomputer unter Berücksichtigung der kapillaren Leitfähigkeit“ Bauzeitung 42(1988)3, S. 113-119
- Häupl, P., Stopp, H., Strangfeld, P.: „Softwarepaket COND zur Feuchteprofilbestimmung in Umfassungskonstruktionen“ Bautenschutz und Bausanierung 12 (1989) S. 53-56
- Häupl, P., Stopp, H., Strangfeld, P.: „Feuchtekatalog für Außenwandkonstruktionen“ Verlagsgesellschaft Rudolph Müller GmbH Köln 1990
- Häupl, P. & Xu, Y.: „Numerical Simulation of Freezing and Melting in Porous Materials under the Consideration of the Coupled Heat and Moisture Transport“ Thermal Envelope & Building Science, July 2001: Vol. 25 No 1, S. 4-31



B Literatur

- Hauser, G. & Stiegel, H.: „Wärmebrücken-Atlas für den Holzbau“ Bauverlag: Wiesbaden, Berlin 1992
- Jenisch, R.: „Berechnung der Feuchtigkeitskondensation in Außenbauteilen und die Austrocknung, abhängig vom Außenklima“ Gesundheitsingenieur, Teil 1 Heft 9 (1971), S. 257 bis 284 und Teil 2 Heft 10 (1971), S. 299 bis 307
- Künzel, H.: „Bauphysik - Geschichte und Geschichten“ Fraunhofer-IRB-Verlag: Stuttgart 2002
- Künzel, H. M.: „Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten“ Dissertation, Universität Stuttgart 1994
- Mainka, G.-W. & Paschen, H.: „Wärmebrückenkatalog“ B.G. Teubner: Stuttgart 1986
- Mualem, Y.: „A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media“ Water Resources Research Vol. 12: S. 513-522, 1976
- Mönck, W. & Eler, K.: „Schäden an Holzkonstruktionen – Analyse und Behebung“ 4. Auflage Huss-Medien: Berlin 2004
- Müller, J. (Hrsg.): „Holzschutz im Hochbau“ Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart, 2005
- Nicolai, A.: „Modelling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Porous Building Materials“ Dissertation, Syracuse University (USA) 2007
- Nicolai, A.: „Implementierung eines analytischen Verfahrens zur hygrothermischen Bewertung von mehrschichtigen Bauteilen“ Diplomarbeit, TU Dresden, 2002
- Perschke, A. & Meinhold, U.: „Ein Modell zur hygrisch-thermischen Gebäudesimulation mit Hilfe der Kopplung von Zonen- und Feldmodell“ In Königsdorf, R., von Treck, C. (Hrsg.): „Tagungsband BauSIM 2006“, S. 151–153, TU München, 2006
- Raschle, P. & Büchli, R.: „Algen und Pilze an Fassaden, Ursachen und Vermeidung“ 2. unveränderte Auflage, Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart 2006
- Rieger, H.: „Numerische Berechnung von Wärmetransportvorgängen bei laminaren, freien Konvektionsströmungen in beliebigen, festen sowie zeitabhängigen, ebenen Geometrien“ Dissertation, TH Darmstadt, 1984.
- Roloff, J.: „Bauklimatik für Architekten - Grundlagen der Bauklimatik 1. Vorlesungsskript Architekten“ Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik 2007
- Rudolphi, A. & Kirchner, D.: „Ökologische und gesundheitsorientierte Baustoff- und Konstruktionsauswahl“ in Moriske, H.-J. & Turouski, E. (Hrsg.): „Handbuch für Bioklima und Lufthygiene“ ecomed-Verlag, Landsberg am Lech (2000), 3. Erg. Lfg., Kap. IV-7.1, S. 12 - 24



Rüdiger, F., Klein, A., & Schütze, J.: „Gekoppelte Simulation in der Hydraulik“
Ölhydraulik und Pneumatik, 47(5):356–359, 2003.

Ruisinger, U. & Plagge, R.: „Die Austrocknung zum Innenraum als wichtiges
Entscheidungskriterium“ in Ansorge, D., Geburtig, G. (Hrsg.): „Historische
Holzbauwerke und Fachwerk - Instandsetzen und Erhalten. Teil 1: Schwerpunkt
Wärme- und Feuchteschutz“, Fraunhofer IRB Verlag, München 2008

Ruisinger, U., Häupl, P., Grunewald, J.: „Hygrothermal analysis of external walls
within the reconstruction of the Rijksmuseum Amsterdam“ Structural Studies,
Repairs and Maintenance of Heritage Architecture IX, Malta June 2005,
Proceedings, S. 345-354

Scheffler, G.: „Validation of hygrothermal material modelling under consideration of
the hysteresis of moisture storage“ Dissertation, TU Dresden, April 2008

Schirmer, R.: „Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die
Verdampfungsgeschwindigkeit“ 2. VDI Beiheft Verfahrenstechnik (1938), S. 170-
177

Sedlbauer, K.: „Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen“
Dissertation, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart 2001

SUNDIALS: <https://computation.llnl.gov/casc/sundials/main.html> am 24.04.2008

Sutter, H.-P.: „Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen“ Bern
Stuttgart Wien: Haupt Verlag, 2002

Venzmer, H. (Hrsg.): „Europäischer Sanierungskalender 2009 - Lehmbau,
Holzschutz, Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung,
Restaurierung, Denkmalpflege“ Beuth Verlag Berlin 2008

Richtlinien und Verordnungen

CEN TC 89/WG 1/N 156: „Thermal bridges – Calculation of surface temperatures
and heat flows“ Working Draft, März 1991

DIN 4108-02:2003-07: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2
Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN 4108-03:2001-07: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3:
Klimabedingter Feuchteschutz“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN V 4108-04:2002-02: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil
4 Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“ Beuth Verlag GmbH:
Berlin

DIN V 4108-06:2003-06: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil
6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“ Beuth
Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 6946:2003-10: „Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und
Wärmedurchgangskoeffizient“ Beuth Verlag GmbH: Berlin



B Literatur

DIN EN ISO 10211:2008-04: „Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN ISO 11274:2001-01: „Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN 12086:1997-08: „Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 12571:2000-04: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 12572:2001-09: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 13788:2001-11: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN 15026:2007-07: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 15148:2003-03: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN EN ISO 15927:2006-09 (Entwurf): „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 3: Berechnung des Schalgregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN V 18550:2005-04: „Putz und Putzsysteme - Ausführung“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN 52616:1977-11: „Wärmeschutztechnische Prüfungen – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommessplatten-Gerät“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN 68800-2:1996-05: „Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

DIN 68800-3:1990-04: „Holzschutz – Teil 3: Vorbeugender chemischer Holzschutz“ Beuth Verlag GmbH: Berlin

ISO 17312:2005-03: „Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit – Sand- und Kiesfraktion“ Beuth Verlag GmbH: Berlin



EnEV: „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)“
Bundesgesetzblatt 2007 Teil I Nr. 34 vom 26. Juli 2007

WTA-Merkblatt 1-2-05: „Der echte Hausschwamm - Erkennung, Lebensbedingungen, vorbeugende Maßnahmen, bekämpfende chemische Maßnahmen, Leistungsverzeichnis“ WTA Publications: München 2003

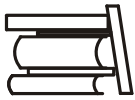
WTA-Merkblätter

WTA Merkblatt 6-3-05: „Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos“ WTA-Publications: München 2006

WTA-Merkblatt E 6-4: „Innendämmung nach WTA - Planungsleitfaden“ WTA Publications: München, 2008

WTA Merkblatt 8-1-03: „Fachwerkinstandsetzung nach WTA I: Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkgebäude“ WTA-Publications: München 2003

WTA Merkblatt 8-5: „Fachwerkinstandsetzung nach WTA V: Innendämmungen“ WTA-Publications: München 2008



C Materialtabelle und Kondensatmengen der unsanierten Varianten

Tabelle C.1: Materialtabelle mit charakteristischen Materialkennwerten

	ρ kg/m ³	λ_R W/m-K	μ -	w_{80} Vol%	w_{eff} Vol%	A_w kg/m ² s ^{0.5}
Altbauklinker	1980	1,00	45	0,3	24,1	0,018
Altbauklinker-Randschicht	2050	1,05	168	0,3	16,4	0,001
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Anbindung Fachwerk-Wärmedämmlehm	710	0,19	15,1	1,7	55,4	0,015
Beton C20/25	2100	2,00	110	11,3	16,7	0,007
Bitumen	1200	0,15	15000	< 0,001	0,25	-
Calciumsilikatdämmung	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Dampfbremse	800	0,15	10000	0,2	1,0	-
Fichte	500	0,13	236	7,5	69,5	0,049
Gipskartonplatte	850	0,20	10	0,7	55,1	0,280
Holzweichfaserdämmplatte	155	0,042	3	1,8	60,0	0,074
Holzwoleleichtbauplatte	380	0,08	2,2	4,6	39,5	0,007
Kalkleichtputz	470	0,169	8,4	6,0	72,6	0,013
Kalkputz (innen)	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Kalkputz (historisch)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Kalksandstein	1750	0,85	28	4,0	33,3	0,048
Kalkzementmörtel	1025	0,225	6,2	4,2	44,5	0,150
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033
Klebemörtel (Calciumsilikat)	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Klebemörtel (Mineraleisplatte)	830	0,184	13,3	5,2	54,0	0,003
Klebemörtel (PUR-Platten)	1500	0,94	30	7,5	24,8	0,011
Klebemörtel-Wärmedämmlehm	560	0,18	12,6	2,0	78	0,0417
Klimaputz	1290	0,595	17,7	8,6	32,1	0,051
Kunstharzoberputz	1100	0,70	350	1,0	11,1	0,002
Lehmmörtel (historisch)	1570	0,70	10,6	4,1	40,7	0,232
Mineraleisplatte	115	0,045	4,1	1,0	96,2	0,004
Mineraleis	40	0,040	1,0	0,3	95,0	-
OSB-Platte	630	0,135	280	3,7	35,0	0,001
PE-Folie	940	0,2	100000	< 0,001	< 0,001	-
Polystyrol - expandiert	23	0,040	50	< 0,001	93,5	-
Polystyrol - expandiert	30	0,03	150	< 0,001	95,0	-
PUR-Platten	35	0,028	100	0,002	94,9	-
PUR-Platten mit kapillarer Durchdringung	50	0,037	27	0,1	94,0	0,013
Porenbeton	390	0,10	7,4	1,5	70,0	0,064
Sandstein (Reinhardsdorf)	1990	2,40	16,5	0,4	20,3	0,189
Sandstein (Posta)	2100	2,45	15,8	0,1	19,4	0,431
Schaumglas	140	0,045	150000	< 0,001	92,0	-
Trasskalk-Mineraleisputz	610	0,10	6,9	6,0	48,7	0,211
Norm-Vollziegel	1400	0,550	18,8	1,1	31,9	0,156

C Materialtabelle und Kondensatmengen der unsanierten Varianten



Tabelle C.1: Materialtabelle mit charakteristischen Materialkennwerten

Wärmedämmlehm-Fachwerk	460	0,068	19,8	1,1	42,5	0,068
Wärmedämmlehmplatte - 40mm	350	0,08	26	0,5	42,2	0,003
Wärmedämmlehmplatte - 80/100mm	350	0,08	28	0,6	41,8	0,015
Wärmedämmlehm (MW)	460	0,080	19,8	2,8	58,5	0,008
Zellulosedämmung	55	0,04	2,1	0,7	70,0	0,376
Zementflissestrich	2060	1,49	25	1,7	25,3	0,081

Tabelle C.2: Maximales inneres Kondensat der unsanierten, niederschlagregenexponierten Konstruktionen. Breite der jeweiligen Schichten in Klammer, die mittlere Schicht besteht aus historischem Lehmörtel, je 10mm breit, oder bei Norm-Vollziegel aus modernem Kalkzementörtel (10mm breit).

Konstruktion	Kondensatmenge in kg/m ²		
	1 (SL)	1½ (SL)	2 (SL)
15 mm Kalkputz (innen) Norm-Vollziegel (240 x 115) 20 mm Kalkzementputz	0,581 (240mm)	0,0 (115/10/240mm)	3,031 (240/10/240mm)
15 mm Kalkputz (historisch) Altbauziegel (250 x 120) 20 mm Kalkzementputz	0,141 (250mm)	0,0 (120/10/250mm)	0,0 (250/10/250mm)
15 mm Kalkputz (historisch) Altbauziegel (250 x 120) 20 mm Kalkputz (historisch)	0,002 (250mm)	0,0 (120/10/250mm)	0,0 (250/10/250mm)
15 mm Kalkputz (historisch) Altbauziegel (250 x 120)	0,680 (250mm)	0,0 (120/10/250mm)	0,0 (250/10/250mm)
15 mm Kalkputz (innen) Kalksandstein (240 x 175) 20 mm Kalkzementputz	0,0 (175mm)	0,0 (240mm)	0,0 (365mm)
<u>Klima Potsdam:</u> 15 mm Kalkputz (historisch) Altbauziegel (250 x 120) 20 mm Kalkzementputz	3,318 (250mm)	1,119 (120/10/250mm)	3,13 (250/10/250mm)



D Klimadaten

Temperatur

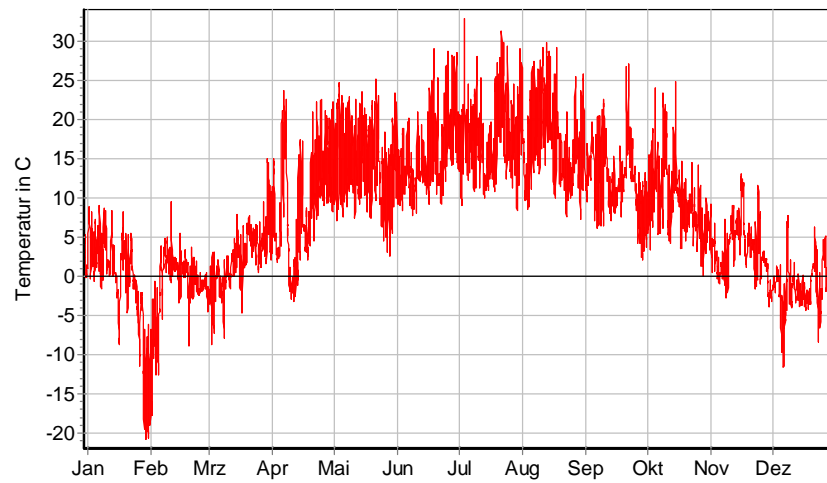


Abb. D.1: Temperatur: Jahresverlauf für Testreferenzregion 13 (Passau)

Relative Luftfeuchte

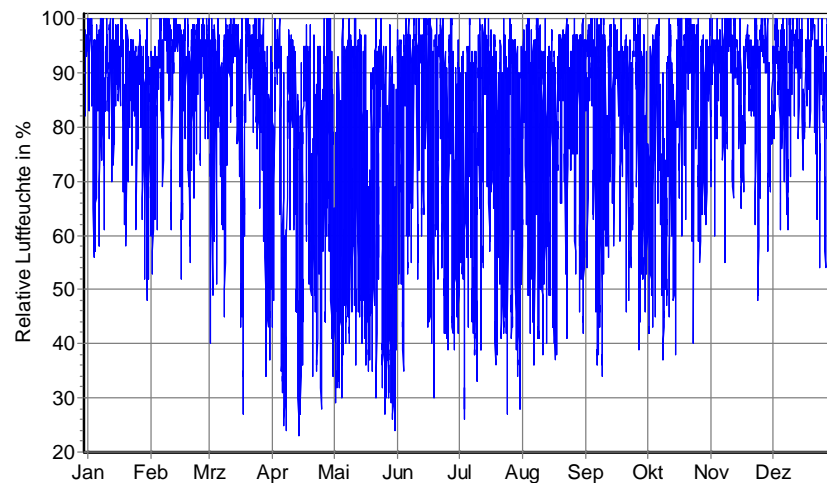


Abb. D.2: Relative Luftfeuchte: Jahresverlauf für Testreferenzregion 13 (Passau)

Niederschlagsmenge

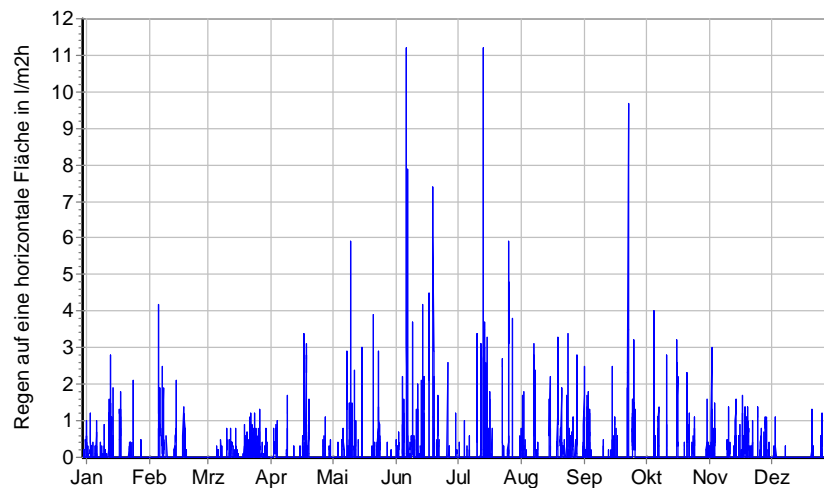


Abb. D.3: Stündliche Niederschlagsmengen auf eine horizontale Fläche: Jahresverlauf für Testreferenzregion 13 (Passau)



Direkte Strahlung

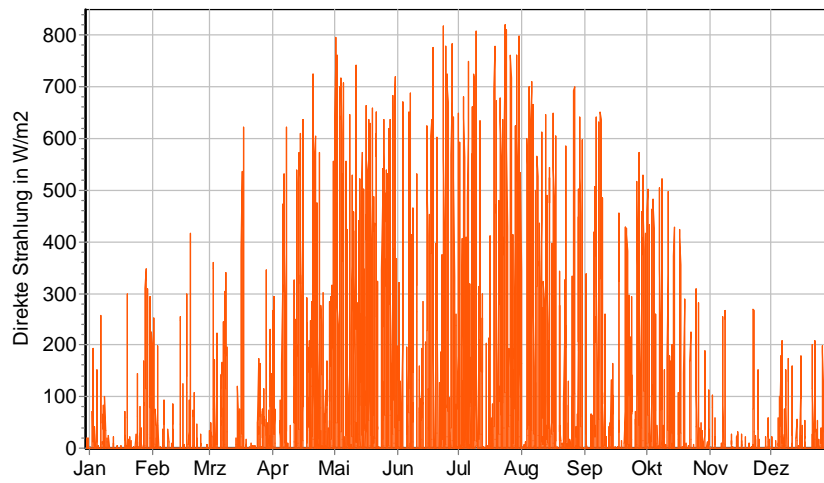


Abb. D.4: Direkte Strahlung: Jahresverlauf für Testreferenzregion 13 (Passau)

Diffuse Strahlung

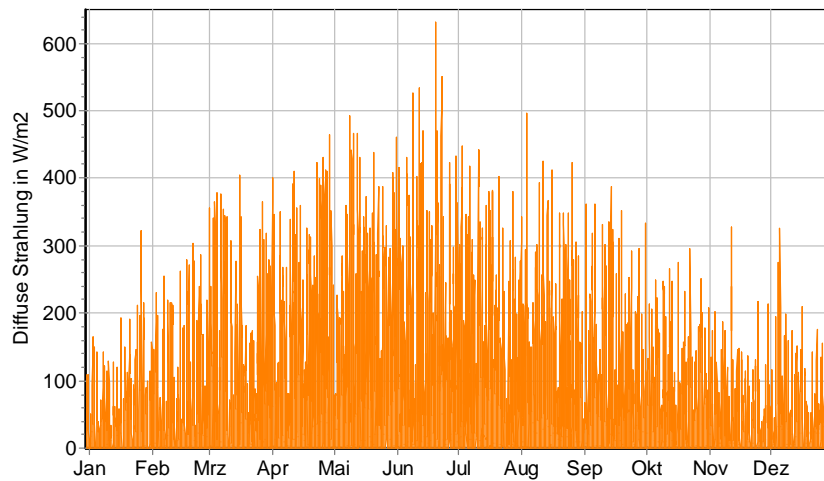


Abb. D.5: Diffuse Strahlung: Jahresverlauf für Testreferenzregion 13 (Passau)

Innenklima

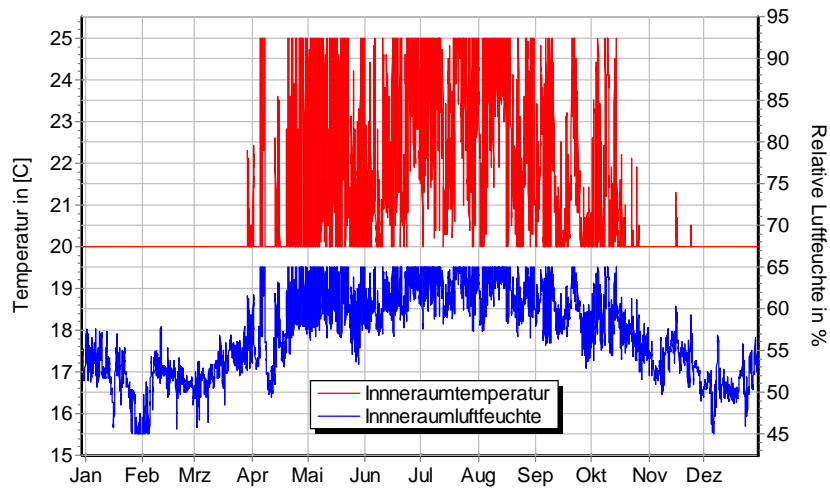


Abb. D.6: Raumklima: Stündliche Werte für Temperaturen (20-25°C) und relative Luftfeuchte (45-65%); entwickelt in Anlehnung an EN 15026 (s. Teil 1, 3.4.3)