Kapitel 12

WINTERLICHER WÄRMESCHUTZ

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Spitzner, Hochschule Biberach,
MHS Ingenieurbüro München

Stand: 08/2025

1. Überblick

Einleitung

Der bauliche Wärmeschutz spielt eine zentrale Rolle für die Energieeffizienz von Gebäuden. Ein gut geplanter Wärmeschutz ermöglicht nicht nur einen sparsamen Energieverbrauch und niedrige Energiekosten, sondern trägt auch zu einem hohen Wohlfühlfaktor bei. Darüber hinaus ist ein effektiver Wärmeschutz die Grundvoraussetzung für energieeffizientes Heizen im Winter. Zusammen mit einem wirksamen Sonnenschutz und wärmespeichernden Bauteilen sorgt er für angenehme Raumtemperaturen im Sommer. Bei einer klugen Planung lassen sich Energieeffizienz, Behaglichkeit und Wohnkomfort für die Bewohner gleichzeitig steigern, wodurch Gebäude langfristig energie- und kostensparend genutzt werden können.

Bedeutung des Wärmeschutzes für den Energieverbrauch

In Deutschland entfallen knapp 30 % des Gesamtenergieverbrauchs auf private Haushalte, das sind 632 TWh/a, wobei 66,8 % davon für Raumwärme und weitere 15,8 % für die Warmwasserbereitung genutzt werden (Bild 1). Trotz intensiver Bemühungen, den Gebäudebestand von fossilen Energieträgern auf regenerative Energieträger umzustellen, stammen nach wie vor rund 80 % der für Raumwärme und Warmwasserbereitung genutzten Energie aus fossilen Quellen. Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors durch den Ersatz fossiler Heizsysteme und die Steigerung der energetischen Qualität der Gebäude sind von entscheidender Bedeutung, um die Treibhausgasemissionen in diesem Sektor zu reduzieren und die Klimaschutzziele zu erreichen.

Wärmeschutz als Klimaschutz

Wärmeschutz ist gleichzeitig Klimaschutz. Je weniger Energie verbraucht wird, desto geringer sind die Emissionen von CO_2, Ruß und Feinstaub. Ein guter baulicher Wärmeschutz trägt somit maßgeblich zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen bei.

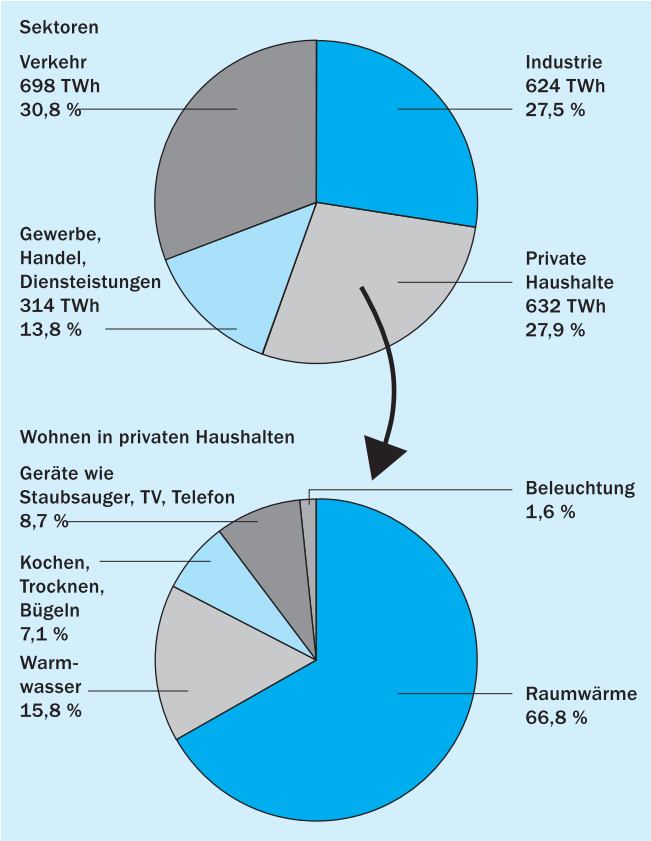


Bild 1 Endenergiebedarf in Deutschland nach Sektoren [1] und für Wohnen in privaten Haushalten im Jahr 2023 [2].

2. Normenwerk zum baulichen Wärmeschutz

Die Gewährleistung eines angemessenen Niveaus des baulichen Wärmeschutzes und der Energieeinsparung in Gebäuden wird durch eine Reihe von Gesetzen und Normen geregelt. Hervorzuheben sind insbesondere das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und die Normenreihen DIN 4108 „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden“ und DIN/TS 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“. Das GEG definiert die grundlegenden öffentlich-rechtlichen Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz und die Energieeinsparung in Gebäuden; es stellt somit den gesetzlichen Rahmen für diesen Bereich dar. Die Normenreihe DIN 4108 konkretisiert die Mindestanforderungen und enthält darüber hinaus weitere Vorgaben u.a. für den baulichen Wärmeschutz und die Energieeinsparung. Die Normenreihe DIN/TS 18599 beschreibt, wie der Energiebedarf von Gebäuden für die Zwecke des Energieausweises berechnet wird.

Obwohl Normen primär privatwirtschaftliche und haftungsrechtliche Bedeutung haben, werden einige Normen, wie die DIN 4108-2 und DIN 4108-3, durch Verweise im GEG oder in bauaufsichtlichen Regelungen öffentlich-rechtlich verbindlich. Es ist aber empfehlenswert, über die Anforderungen der DIN 4108 und des GEG hinauszugehen, um zukunftsfähige Gebäude zu realisieren. Ziel sollte es sein, Gebäude zu planen, die nicht nur den aktuellen Mindestanforderungen genügen, sondern auch in Zukunft den steigenden Anforderungen an Wärmeschutz, Wohnkomfort und Energieeffizienz gerecht werden (Bild 2). Solche Gebäude zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch aus, der möglichst ohne schädliche Umweltkonsequenzen gedeckt werden kann, und bleiben langfristig werthaltig.

Energieeffizienzanforderungen im Gebäudeenergiegesetz

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) stellt ganzheitliche Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden, indem es die Kombination aus Gebäudehülle, Anlagentechnik und Energieträger berücksichtigt. Im Gegensatz zu früheren Regelungen, die sich auf bauteilbezogene Anforderungen wie den Dämmwert konzentrierten, adressiert das GEG nun das Gebäude als Gesamtsystem. Bauteilspezifische Anforderungen werden lediglich noch für die Sanierung einzelner Bauteile in Bestandsimmobilien gestellt.

Baulicher Mindestwärmeschutz nach DIN 4108

Die Normenreihe DIN 4108, insbesondere Teil 2, legt hingegen Mindestanforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle fest, sowohl in der Bauteilfläche als auch im Bereich von Wärmebrücken. Diese Mindestanforderungen dienen primär hygienischen Zwecken, wie der Vermeidung von Oberflächenkondensat, Tauwasser und Schimmelpilzbildung, und somit dem thermischen und gesundheitlichen Schutz der Nutzer. DIN 4108-2 ist bauaufsichtlich eingeführt und als Teil der Technischen Baubestimmungen in der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVVTB) verbindlich vorgeschrieben.

Praxisrelevanz des baulichen Mindestwärmeschutzes

In der Praxis werden die Mindestanforderungen des baulichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 in der Bauteilfläche meist deutlich übertroffen, da Bauteile, die lediglich den Mindestanforderungen entsprechen, weit hinter den heutigen Ansprüchen an Energieeinsparung, Komfort und erwarteter Bauqualität zurückbleiben würden. Die Einhaltung der DIN 4108-2 stellt somit eine Mindestanforderung dar, die in der Praxis aufgrund höherer Energieeffizienzstandards und Qualitätsansprüche regelmäßig überschritten wird.

Ganzheitliche Berechnung des Energiebedarfs

Die Normenreihe DIN/TS 18599 beschreibt die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs des Gebäudes, im Zusammenspiel aus Gebäudehülle, Anlagentechnik und Nutzung. Sie wird durch das GEG als Grundlage für die energetische Bewertung im Energieausweis festgelegt.

Darüber hinaus werden viele grundlegende bauphysikalische Berechnungsverfahren für die Gebäudehülle in internationalen Normen beschrieben, auf die die deutschen Normen verweisen. Die wichtigsten Normen, physikalischen Größen, Formelzeichen und Einheiten im Bereich der baulichen Wärmedämmung und des klimabedingten Feuchteschutzes sind im Anhang zusammengefasst (Tafeln A1 und A2).

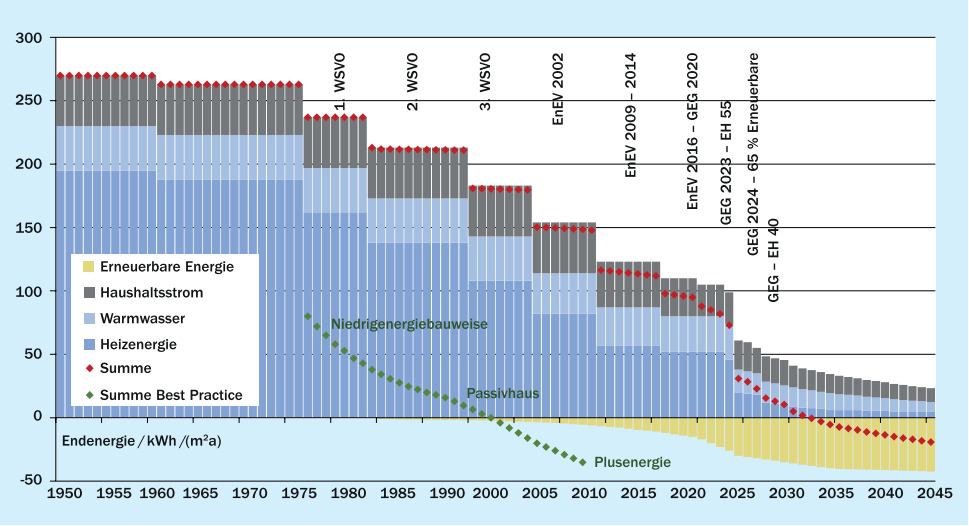


Bild 2 **Entwicklung des Endenergiebedarfs von Neubauten, Vergleich von gesetzlichen Mindestanforderungen und Best-Practice-Standard**

2.1 Normenreihe DIN 4108

Die Normenreihe DIN 4108 besteht aus den Teilen:

DIN 4108 Teil 2:
Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz

DIN 4108 Teil 3:
Klimabedingter Feuchteschutz

DIN 4108 Teil 4:
Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte

DIN 4108 Teil 7:
Luftdichtheit

DIN/TS 4108 Teil 8:
Schimmelvermeidung in Wohngebäuden

DIN 4108 Teil 10:
Anwendungstypen von Dämmstoffen

DIN 4108 Teil 11:
Klebebänder und Klebemassen für die Luftdichtheit

Beiblatt 2:
Vermeidung von Wärmebrücken

Bild 3 Gliederung der DIN 4108

Sie ist unter dem Namen DIN 4108 erstmalig 1952 erschienen, damals noch mit recht überschaubarem Umfang und ohne Unterteile. Sie wurde seitdem mehrfach überarbeitet, erweitert und der Übersichtlichkeit halber in mehrere Teile aufgeteilt. Ihre aktuellen Festlegungen gelten für Neubauten und für den Ersatz oder Einbau von Bauteilen in bestehende Gebäuden; für unveränderte Bauteile bestehender Gebäude ist die Fassung zum Zeitpunkt der Errichtung maßgeblich. Wesentliche Inhalte der einzelnen Normenteile sind (Bild 3):

- DIN 4108-2 legt die Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Bauteilen und im Bereich von Wärmebrücken fest. Zusätzlich enthält sie Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, ein vereinfachtes Nachweisverfahren sowie Bedingungen für eine thermische Gebäudesimulation als Nachweis. Die Norm ist bauaufsichtlich eingeführt, mit Ausnahme der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, welche mittelbar durch den Verweis aus dem GEG Bedeutung erlangen.
- DIN 4108-3 behandelt den klimabedingten Feuchteschutz, das sogenannte Glaser-Verfahren (Blockklima-Verfahren) sowie zugehörige Anforderungen und Rechenverfahren. Ferner enthält sie eine umfangreiche Liste an Bauteilen, die in dieser Hinsicht keines weiteren Nachweises bedürfen (nachweisfreie Bauteile).
- DIN 4108-4 tabelliert wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, die für die Berechnungen zu verwenden sind. Sie legt die Umrechnung von Nennwerten der Wärmeleitfähigkeit nach europäischen Produktnormen, nationalen oder europäischen Produktzulassungen oder Bauartgenehmigungen in Bemessungswerte fest. International vereinheitlichte Materialkennwerte finden sich in DIN EN ISO 10456.
- DIN 4108-7 gibt Anforderungen und Ausführungshinweise zur Luftdichtheit der Gebäudehülle.
- DIN/TS 4108-8 erläutert Aspekte und Zusammenhänge zur Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden und stellt ein Berechnungsverfahren für den Nachweis ausreichender Fensterlüftung zum Feuchteschutz dar.
- DIN 4108-10 definiert die Anwendungstypen von Dämmstoffen und listet die erforderlichen Eigenschaftswerte auf.
- DIN 4108-11 stellt Anforderungen an bauliche Klebebänder und Klebemassen zur Herstellung luftdichter Ebenen.
- DIN 4108 Beiblatt 2 [7] gibt Empfehlungen zur Wärmebrückenreduzierung bei Bauteilanschlüssen und legt Anforderungen für den verminderten Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} fest.

2.2 Normenreihe DIN/TS 18599

Die Normenreihe DIN V 18599 beziehungsweise DIN/TS 18599 definiert die rechnerische Vorgehensweise zur energetischen Bewertung von Gebäuden, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und der Nutzung des Gebäudes. Bis 2018 als Vornorm (V) veröffentlicht, wird sie seitdem, neu überarbeitet, als Technische Spezifikation (TS) herausgegeben. Der Umfang dieser Normenreihe (Tafel 1) erstreckt sich von den Grundlagen und grundsätzlichen Bilanzierungsgleichungen in Teil 1 über die energetische Bewertung der Gebäudehülle in Teil 2 bis hin zur Bewertung der Heizungs-, Warmwasser-, Lüftungs-, Klimatechnik, Beleuchtung und Gebäudeautomation in den Teilen 3 bis 9 sowie 11. Teil 10 legt die anzusetzenden Nutzungsprofile für Gebäude und Anlagentechnik fest. Die früheren Teile 12 und 13 enthielten Tabellenverfahren für Wohn- und Nichtwohngebäude auf dem Normenstand von 2018, und wurden mit der Aktualisierung 2025 zurückgezogen.

Im Normenwerk wurde die frühere Fokussierung auf den Wärmeverlust im Winter auch sprachlich durch einen allgemeineren Bezug auf Wärmetransport oder Wärmetransfer ersetzt, um eine nahtlose Anwendbarkeit der Normen und Verfahren auch für den sommerlichen Wärmeeintrag zu gewährleisten. Formulierungen, Formelzeichen und Gleichungen gelten somit sowohl für den Winter als auch für den Sommer. Dabei werden im Normenwerk Wärmeeinträge in den Raum, die im Winter erwünscht, im Sommer jedoch unerwünscht sind, konse-

Tafel 1 Normenreihe DIN/TS 18599

Teil 1	**Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger:** Grundlagen für die ganzheitliche Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs von Gebäuden; Begriffe und Methoden; Zusammenspiel der Normteile
Teil 2	**Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen:** Raumbilanz und Berechnung des Nutzenergiebedarfs für Heizen und Kühlen der Gebäudehülle.
Teil 3	**Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung:** Nutzenergiebedarf für Lüftung und Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden, inklusive Endenergiebedarf für die Luftförderung.
Teil 4	**Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung:** Ermittlung des monatlichen und jährlichen Endenergiebedarfs für Beleuchtungszwecke in Nichtwohngebäuden, inkl. Berücksichtigung der Tageslichtnutzung und des Einflusses von Präsenzmeldesystemen.
Teil 5	**Endenergiebedarf von Heizsystemen:** Bestimmung des Nutz- und Endenergiebedarfs von Heizsystemen in Wohn- und Nichtwohngebäuden, einschließlich Wärmeübergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung.
Teil 6	**Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau:** Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs für Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsysteme in Wohngebäuden.
Teil 7	**Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau:** Berechnung des energetischen Verhaltens von RLT- und Klimakälteanlagen in Nichtwohngebäuden.
Teil 8	**Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungsanlagen:** Bestimmung des Nutz- und Endenergiebedarfs für die Trinkwarmwassererwärmung in Wohn- und Nichtwohngebäuden.
Teil 9	**End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen:** Bewertung der Stromerzeugung im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude; Berechnung des End- und Primärenergiebedarfs insbesondere von Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).
Teil 10	**Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten:** Zusammenstellung der maßgeblichen Nutzungsrandbedingungen ca. 40 Nutzungsprofile von Wohn- und Nichtwohngebäuden, einschließlich der Klimadaten für das Referenzklima Deutschland. Die Nutzungsrandbedingungen umfassen unter anderem Raum-Solltemperaturen, interne Wärmegewinne, Nutzungszeiten, Trinkwarmwasserbedarf und Luftwechsel. Die Nutzungsrandbedingungen sind für den GEG-Nachweis heranzuziehen und bieten darüber hinaus Informationen für die Anwendung im Rahmen der Energieberatung.
Teil 11	**Gebäudeautomation:** Anforderungen an die Gebäudeautomation für deren Bewertung; inklusive Überwachung, Steuerung und Regelung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen und anderen Komponenten der Gebäudeautomation für Wohn- und Nichtwohngebäude.
Teil 12	**Tabellenverfahren für Wohngebäude:** Tabellenverfahren für die energetische Bewertung von Wohngebäuden, basierend auf dem ausführlichen Verfahren der Norm (Stand 2018). Wird nicht mehr auf die Ausgabe 2025 aktualisiert; entfällt mit der Veröffentlichung von DIN/TS 18599:2025.
Teil 13	**Tabellenverfahren für Nichtwohngebäude:** Tabellenverfahren für die energetische Bewertung von Nichtwohngebäuden, basierend auf dem ausführlichem Verfahren der Norm (Stand 2018). Wird nicht mehr auf die Ausgabe 2025 aktualisiert; entfällt mit der Veröffentlichung von DIN/TS 18599:2025.
Beiblatt 1	Bedarfs-/Verbrauchsabgleich
Beiblatt 3	Standardisiertes Ausgabeformat für die Berechnungsergebnisse einer Gebäude- Energiebilanz

quent als Wärmequellen bezeichnet, während Wärmeausträge aus dem Raum, die im Sommer erwünscht, im Winter jedoch unerwünscht sind, als Wärmesenken definiert werden. Diese Terminologie ermöglicht eine wertungsfreie und durchgehend logische Begrifflichkeit.

2.3 Grundlegende ISO-Berechnungsnormen für die Gebäudehülle

Die bauphysikalischen Berechnungsverfahren für die Bauteile der Gebäudehülle sind in einer Reihe internationaler ISO-Normen verankert, die vom DIN als DIN EN ISO übernommen wurden. Diese Normen bilden die Grundlage für eine konsistente und detaillierte Bewertung der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle und ermöglichen eine Betrachtung aller relevanten Einflussfaktoren.

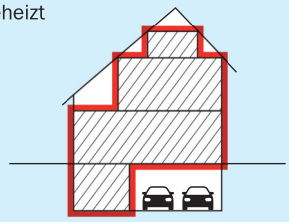
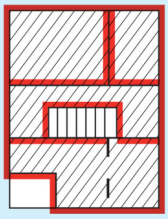
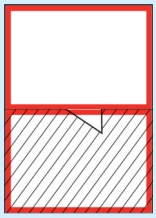
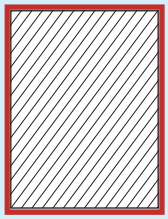
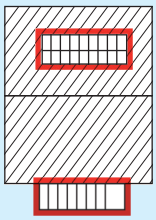
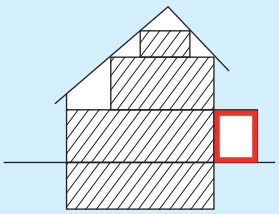
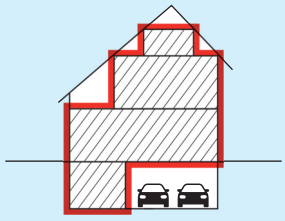
- DIN EN ISO 6946 regelt die Berechnung des stationären Wärmedurchgangswiderstands R und des Wärmedurchgangskoeffizienten U für opake Bauteile.
- DIN EN ISO 10211 behandelt die numerische Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten ψ von Wärmebrücken.

- DIN EN ISO 10077-1 und -2 legen die Berechnungsverfahren für die U-Werte von transparenten und teiltransparenten Bauteilen wie Fenstern, Türen und Abschlüssen fest.
- DIN EN ISO 12631 behandelt den U-Wert von Vorhangfassaden.
- DIN EN ISO 13786 ist für die Berechnung dynamischer Wärmetranfers unter Kopplung von Wärmetransfer und Wärmespeicherung maßgeblich, beispielsweise beim Wärmetransport durch erdberührte Bauteile unter Berücksichtigung des Wärmespeichervermögens des Erdreichs, oder für die effektive Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes im sommerlichen Wärmeschutz.
- DIN EN ISO 13789 definiert die Berechnungsgrundlagen für den Transmissions- und Lüftungswärmetransferkoeffizienten *H*.
- DIN EN ISO 13370 beschreibt die detaillierte Berechnung der Wärmeübertragung über das Erdreich. Alternativ hierzu kann ein vereinfachter nationaler Ansatz mit Temperaturkorrekturfaktoren F_x nach DIN/TS 18599-2 und DIN 4108 Beiblatt 2 angewendet werden, wobei sich der U-Wert des erdberührten Bauteils dann nicht nach DIN EN ISO 13370, sondern als konstruktiver U-Wert aus der Schichtfolge des Bauteils und den üblichen Wärmeübergangswiderständen gemäß DIN EN ISO 6946 ergibt.

2.4 Beheizter Bereich und wärmeübertragende Gebäudehülle

Die wärmeübertragende Gebäudehülle, früher als thermische Hüllfläche bezeichnet, umgibt das beheizte beziehungsweise gekühlte Gebäudevolumen lückenlos und grenzt es gegen die Außenluft, das Erdreich oder unkonditionierte Bereiche wie Dachböden, Keller, Garagen und Anbauten ab (Tafel 2).

Tafel 2 Relevante Aspekte zur Beurteilung der wärmeübertragenden Gebäudehülle

	Die Gebäudehülle umschließt alle beheiz- oder kühlbaren Räume, unabhängig davon, ob diese tatsächlich ständig, gelegentlich oder gar nicht auf mehr als 12 °C beheizt beziehungsweise ob sie gekühlt werden.
	Ein Raum gilt als beheizbar, wenn er über eine eigene Heizfläche oder Heizeinrichtung verfügt, durch offenen Raumverbund mit beheizten Nachbarräumen beheizt wird oder vollständig innenliegend und somit indirekt durch die umgebenden Bauteile beheizt wird.
	Bei Türen zwischen benachbarten Räumen haben diese Räume keinen offenen Raumverbund, selbst wenn die Türen praktisch immer offenstehen sollten.
	Zu den beheizten Räumen zählen üblicherweise Aufenthalts-, Wohn, Schlaf-, Büro-, Geschäfts-, Verkaufs-, Warte-, Gast-, Versammlungs-, Unterrichts-, Kranken-, Sport- und Spielräume, ebenso Wohnküchen und beheizte Glasvorbauten.
	Treppenhäuser ohne eigene Heizkörper können wahlweise als indirekt beheizt (innerhalb der Gebäudehülle) oder als unbeheizt (außerhalb der Gebäudehülle) eingestuft werden.
	Anbauten oder vorgelagerte Räume ohne direkte oder indirekte Beheizbarkeit, wie Garagen und nicht beheizbare Glasvorbauten, liegen außerhalb der wärmeübertragenden Gebäudehülle.
	Die Überlegungen zur wärmeübertragenden Gebäudehülle gelten analog für die Gebäudehülle, die im Sommer einen gekühlten Bereich gegen Außenluft oder unbeheizte Bereiche abgrenzt.

3. Von der Wärmeleitfähigkeit zum U-Wert

Die wärmetechnischen Kennwerte für den öffentlich-rechtlichen Nachweis nach GEG, für den Energieausweis und für Förderprogramme sind nach den oben genannten Normen zu bestimmen. Die Verwendung „alternativer“ Berechnungsverfahren oder „alternativer Kennwerte“ sind Planungsfehler.

3.1 Wärmestrom, Widerstand

Wärmedurchgangswiderstand

Der Wärmetransport durch ein Bauteil erfolgt in einer Reihenschaltung von Widerständen. Die Energie muss nacheinander den Wärmeübergangswiderstand R_{si} an der Bauteilinnenseite, die einzelnen Wärmedurchlasswiderstände R_i aller Baustoffschichten, sowie den Wärmeübergangswiderstand R_{se} an der Bauteilaußenseite überwinden. Analog zum elektrischen Stromkreis ergibt sich der Gesamtwärmedurchgangswiderstand R_{tot} als Summe der Einzelwiderstände. Der Index „tot“ steht für „total“. Je größer R_{tot} ist, desto ausgeprägter ist die Dämmwirkung des Bauteils.

Für die insgesamt von der Luft auf der einen Seite zur Luft auf der anderen Seite transportierte Energiemenge sind durchaus auch andere Bezeichnungen gebräuchlich, beispielsweise Wärme, Wärmemenge, Energie, Wärmeverlust, Wärmesenke, Wärmegewinn, Wärmequelle.

Phasen des Wärmetransfers durch ein Bauteil

Die Wärmeübertragung von der Raumluft auf die Innenoberfläche erfolgt mittels Luftströmung (Konvektion), Wärmeleitung und von den Innenoberflächen der umgebenden Bauteile mittels Wärmestrahlung. Beides wird im Wärmeübergangswiderstand R_{si} zusammengefasst, wobei der Index „si“ für „surface interior“ steht.

In den Baustoffschichten erfolgt der Wärmetransport durch alle 3 Transportphänomene: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Sie werden aber vereinfachend zu einer effektiven Wärmeleitfähigkeit λ der Baustoffe zusammengefasst (Bild 4). Der Wärmedurchlasswiderstand R einer einzelnen Schicht ist die Dicke der Schicht geteilt durch die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs der Schicht. Bei mehrschichtigen Bauteilen ist die Summe der Einzelwiderstände der Schichten der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R.

An der Bauteilaußenseite tritt eine Wärmeabgabe über Konvektion (v.a. durch Wind) und Wärmeleitung an die Außenluft auf, sowie eine Wämeabgabe über Wärmestrahlung an umliegende Gebäudeoberflächen und den Himmel. Beide werden im äußeren Wärmeübergangswiderstand R_{se} zusammengefasst, mit Index „se“ für „surface exterior“.

Wärmeübergangswiderstände

Die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} sind in der Norm DIN EN ISO 6946 tabelliert (Tafel 5). Bei direktem Kontakt zweier Schichten, beispielsweise zwischen Kellerwand und Erdreich, entfällt der Wärmeübergangswiderstand R_{se}, da dieser Null beträgt. Der Kehrwert des Wärmeübergangswiderstands an einer Bauteiloberfläche ist der Wärmeübergangskoeffizient h für diese Oberfläche.

U-Wert

Der Kehrwert des Gesamtwärmedurchgangswiderstands R_{tot} ist der Wärmedurchgangskoeffizient U, auch als U-Wert des Bauteils bezeichnet. Je niedriger der U-Wert, desto besser die Dämmwirkung. Das Endergebnis des U-Werts wird auf zwei wertanzeigende Stellen gerundet, bei opaken Bauteilen üblicherweise die ersten beiden Nachkommastellen (z.B. 0,23 W/(m²K)), bei Fenstern häufig eine Vor- und eine Nachkommastelle (z.B. 1,3 W/(m²K)). Diese Rundung entspricht der Genauigkeit der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit. Für Zwischenergebnisse werden drei oder mehr wertanzeigende Stellen beibehalten. Den Wärmetransport durch (opake und transparente) Bauteile, der durch den U-Wert des Bauteile charakterisiert wird, nennt man Transmission.

INFO

Der Wärmedurchgangskoeffizient *U*, ausgedrückt in der Einheit W/(m²K), quantifiziert den stationären Wärmetransfer durch ein Bauteil pro Flächeneinheit und Kelvin Temperaturdifferenz zwischen den begrenzenden Lufträumen. Präziser formuliert, repräsentiert der U-Wert die stationäre Wärmetransportleistung in Watt pro Quadratmeter Bauteilfläche (bzw. die transportierte Energiemenge in Wh pro Stunde), die bei einer Lufttemperaturdifferenz von 1 Kelvin zwischen den Bauteilseiten auftritt.

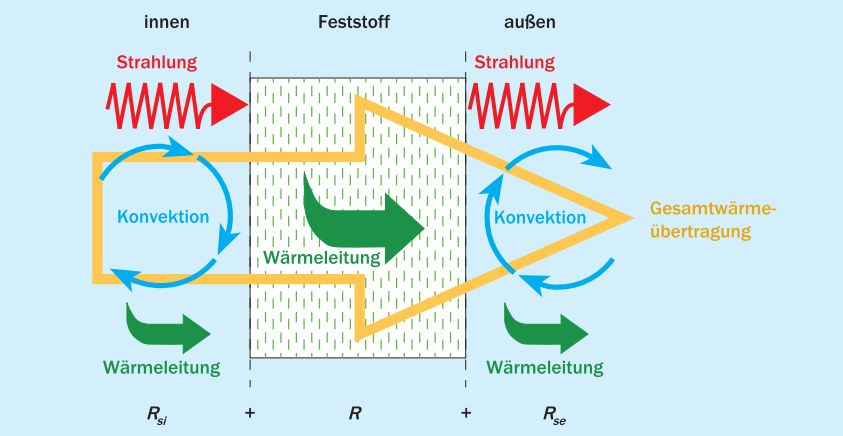


Bild 4 Wärmedurchgang durch ein Bauteil

Die Bestimmung des U-Werts erfolgt gemäß den Normen DIN EN ISO 6946 für homogene Bauteile sowie DIN EN ISO 6946 in Verbindung mit DIN EN ISO 10211 für inhomogene Bauteile. Hierbei finden die Wärmeleitfähigkeiten und Schichtdicken aller im Bauteil enthaltenen Materialien sowie die Wärmeübergangswiderstände an den Oberflächen Berücksichtigung.

Der U-Wert stellt die zentrale Kenngröße zur wärmetechnischen Beurteilung von Außenbauteilen wie Wänden, Dächern und Fenstern dar. Er findet Anwendung bei der energetischen Gebäudebewertung, der Auslegung von Heizungs- und Kühlsystemen so-

wie der Überprüfung gesetzlicher Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. Die Minimierung der U-Werte ist ein wesentliches Ziel beim energieeffizienten Bauen und Sanieren von Gebäuden (Tafel 4).

Wärmetransferkoeffizient

Der Transmissionswärmetransferkoeffizient H_T, mit dem Index „T" für Transmission, beschreibt die pro Kelvin Lufttemperaturunterschied durch die gesamte Bauteilfläche transportierte Wärmemenge pro Zeiteinheit. Er berechnet sich als Produkt aus U-Wert und Bauteilfläche. Das flächengewichtete Mittel der H_T-Werte aller Hüllflächenbauteile inklusive Wärmebrückeneinfluss ΔU_{WB}, dividiert durch die Gesamtfläche A der wärmeübertragenden Gebäudehülle, ergibt den Koeffizienten H'_T. Dieser stellt eine Nebenanforderungsgröße des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) an die energetische Qualität der Gebäudehülle dar (Tafel 3).

Solare Wärmegewinne auf opaken Bauteilen

Der solare Energiegewinn durch Aufheizung der Bauteilaußenoberfläche wird nicht im U-Wert berücksichtigt, sondern kann separat als Wärmequelle in der Gebäudebilanz angesetzt werden. Dieser Effekt ist bei gut gedämmten Bauteilen allerdings vernachlässigbar gering.

Elektrisches Analogon

Zur Veranschaulichung lässt sich der Wärmetransport mit der Analogie zum elektrischen Strom beschreiben: Das treibende Potential ist die Temperatur beziehungsweise der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft, analog zur elektrischen Spannung bzw. Potentialdifferenz. Der Wärmedurchlasswiderstand R_i einer Baustoffschicht entspricht dem elektrischen Widerstand, R_{tot} dem Gesamtwiderstand der Schaltung. Die transportierte Wärmemenge Q entspricht der elektrischen Ladungsmenge, der Wärmestrom Q/t (Wärmemenge pro Zeit) dem elektrischen Strom (Ladung pro Zeit).

Tafel 3 Formeln zum Wärmedurchgang durch ebene homogene opake Bauteile

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad [\mathrm{m^2 \cdot K/W}] \text{ für die i-te Schicht und} \qquad (3.1)$$

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se} = R_{si} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad [\mathrm{m^2 \cdot K/W}] \qquad (3.2)$$

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad [\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}] \qquad (3.3)$$

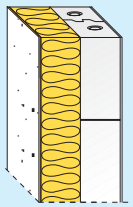
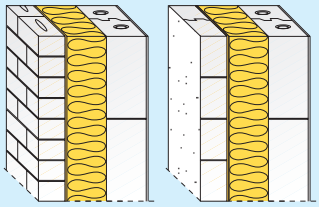
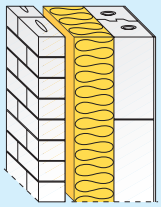
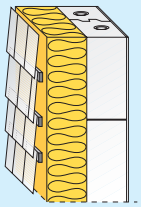
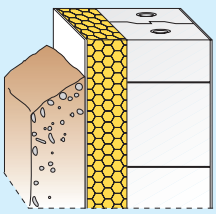
$$H_T = U \cdot A \quad [\mathrm{W/K}] \qquad (3.4)$$

$$H'_T = \frac{\Sigma_i U_i \cdot A_i + \Delta U_{WB}}{\Sigma_i A_i}$$

mit

d	Dicke einer Baustoffschicht in m
λ	Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
R	Wärmedurchlasswiderstand in m²K/W
R_{si}, R_{se}	Wärmeübergangswiderstände innen bzw. außen in m²K/W
h_i, h_e	Wärmeübergangskoeffizienten innen bzw. außen, in W/(m²K); $h_i = 1/R_{si}$ und $h_e = 1/R_{se}$
R_{tot}	Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils (von Luft innen zu Luft außen) in m²K/W
U	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) in W/(m²K); $1/R_{tot}$ = U
H_T	Transmissionswärmetransferkoeffizient des ganzen Bauteils in W/K
A	Bauteilfläche
H'_T	flächengewichtetes Mittel der U-Werte der wärmeübertragenden Gebäudehülle (inklusive Wärmebrückeneinfluss), in W/(m²K)
ΔU_{WB}	Gesamter Wärmebrückeneinfluss in der wärmeübertragenden Gebäudehülle
Φ, Q	pro Zeiteinheit übertragene Energiemenge in Wh oder kWh; ergibt sich aus dem Produkt von U-Wert, Bauteilfläche, Lufttemperaturdifferenz zu beiden Seiten des Bauteils, und Zeitdauer dieser Lufttemperaturdifferenz
Index *i*	Laufvariable für die i-te Schicht des Bauteils
Index s	Bauteiloberfläche (surface)
Index *tot*	Gesamt (total)
Index *T*	Transmission

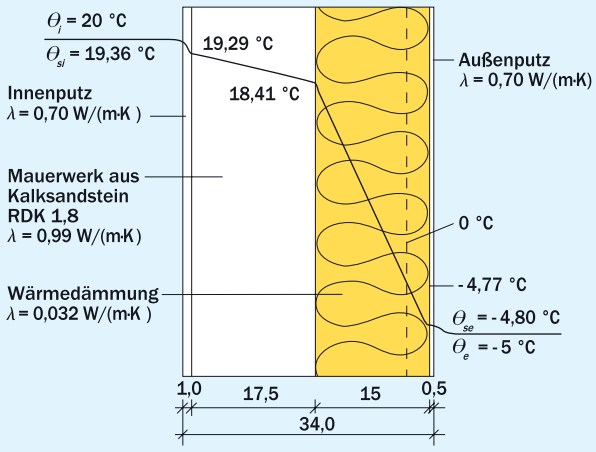
Tafel 4 U-Werte von KS-Außenwänden (Beispiele)

	Dicke des Systems [cm]	Dicke der Dämmschicht [cm]	U [W/(m²·K)] λ [W/(m·K)] 0,022	0,024	0,032	0,035	Wandaufbau
	29,5	10	0,20	0,22	0,29	0,31	**Einschalige KS-Außenwand mit Wärmedämm-Verbundsystem** R_{si} = 0,13 (m²·K)/W 0,01 m Innenputz λ = 0,70 W/(m·K) 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8)[1] λ = 0,99 W/(m·K) Wärmedämmstoff Typ WAP 0,01 m Außenputz λ = 0,70 W/(m·K) R_{se} = 0,04 (m²·K)/W
	33,5	14	0,15	0,16	0,21	0,23	
	35,5	16	0,13	0,14	0,19	0,20	
	39,5	20	0,11	0,11	0,15	0,16	
	43,5	24	0,09	0,10	0,13	0,14	
	49,5	30	0,07	0,08	0,10	0,11	
	41,0	10	0,19	0,21	0,27	0,29	**Zweischalige KS-Außenwand mit Wärmedämmung** R_{si} = 0,13 (m²·K)/W 0,01 m Innenputz λ = 0,70 W/(m·K) 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8)[1] λ = 0,99 W/(m·K) Wärmedämmstoff Typ WZ 0,01 m Fingerspalt R = 0,15 (m²·K)/W 0,115 m KS-Verblendschale λ = 1,1 W/(m·K) (KS Vb RDK 2,0)[1] oder verputzte KS-Vormauerschale R_{se} = 0,04 (m²·K)/W
	43,0	12	0,16	0,18	0,23	0,25	
	45,0	14	0,14	0,16	0,20	0,22	
	47,0	16	0,13	0,14	0,18	0,19	
	49,0	18	0,11	0,12	0,16	0,17	
	51,0	20	0,10	0,11	0,15	0,16	
	55,0	24	0,09	0,09	0,12	0,13	
	44,0	10	0,20	0,22	0,28	0,30	**Zweischalige KS-Außenwand mit Wärmedämmung und Luftschicht** R_{si} = 0,13 (m²·K)/W 0,01 m Innenputz λ = 0,70 W/(m·K) 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8)[1] λ = 0,99 W/(m·K) Wärmedämmstoff Typ WZ R_{se} = 0,13 (m²·K)/W ≥ 0,04 m Luftschicht 0,115 m KS-Verblendschale (KS Vb RDK 2,0)
	46,0	12	0,17	0,18	0,24	0,26	
	48,0	14	0,15	0,16	0,21	0,22	
	50,0	16	0,13	0,14	0,18	0,20	
	52,0	18	0,12	0,13	0,16	0,18	
	54,0	20	0,10	0,11	0,15	0,16	
	31,5	10	0,20	0,22	0,28	0,30	**Einschalige KS-Außenwand mit hinterlüfteter Außenwandbekleidung** R_{si} = 0,13 (m²·K)/W 0,01 m Innenputz λ = 0,70 W/(m·K) 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8)[1] λ = 0,99 W/(m·K) Nichtbrennbarer Wärmedämmstoff WAB R_{se} = 0,13 (m²·K)/W 0,02 m Hinterlüftung 0,01 m Fassadenbekleidung
	33,5	12	0,17	0,18	0,24	0,26	
	37,5	16	0,13	014	0,18	0,20	
	41,5	20	0,10	0,11	0,15	0,16	
	45,5	24	0,09	0,10	0,13	0,14	
	51,5	30	0,07	0,08	0,10	0,11	
	47,5	10	–	–	–	0,34	**Einschaliges KS-Kellermauerwerk mit außen liegender Wärmedämmung (Perimeterdämmung)** R_{si} = 0,13 (m²·K)/W 0,01 m Innenputz λ = 0,70 W/(m·K) 0,30 m Kalksandstein (RDK 1,8)[1] λ = 0,99 W/(m·K) Perimeterdämmung Typ PW R_{se} = 0 (m²·K)/W
	51,5	14	–	–	–	0,26	
	53,5	16	–	–	–	0,24	
	57,5	20	–	–	–	0,20	
	61,5	24	–	–	–	0,18	

Zur Berechnung der U-Werte sind ausschließlich Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit λ_B anzusetzen.
[1] Bei anderen Dicken oder Steinrohdichteklassen ergeben sich nur geringfügig andere U-Werte.

Tafel 5 **Berechnung des U-Werts von Außenwänden aus homogenen Schichten (Beispiele)**

a) Einschaliges Kalksandstein-Mauerwerk mit WDVS

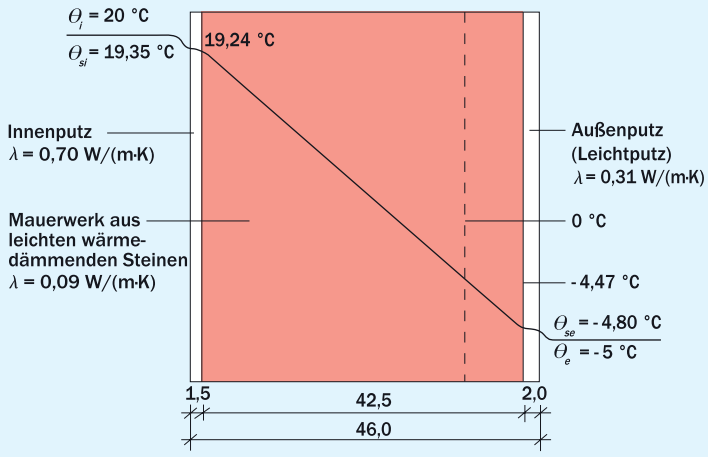


d = 0,34 m
U = 0,20 W/(m²·K)

Aufbau von innen nach außen:

1 cm	Gipsputz (λ = 0,70 W/(m·K))
17,5 cm	KS-Mauerwerk der RDK 1,8 (λ = 0,99 W/(m·K))
15 cm	WDVS (λ = 0,032 W/(m·K))
0,5 cm	Außenputz (λ = 0,70 W/(m·K))

b) Monolithische Außenwand



d = 0,46 m
U = 0,20 W/(m²·K)

Aufbau von innen nach außen:

1,5 cm	Gipsputz (λ = 0,70 W/(m·K))
42,5 cm	Mauerwerk aus leichten wärmedämmenden Steinen mit Leicht- oder Dünnbettmörtel (λ = 0,09 W/(m·K))
2,0 cm	Faserleichtputz ≤ 700 kg/m³ (λ = 0,31 W/(m·K))

Berechnung des U-Werts durch Einsetzen in die Formel:

Wand a)
$$U = \frac{1}{0{,}13\,\frac{m^2\cdot K}{W} + \frac{0{,}01\,m}{0{,}70\,\frac{W}{m\cdot K}} + \frac{0{,}175\,m}{0{,}99\,\frac{W}{m\cdot K}} + \frac{0{,}15\,m}{0{,}032\,\frac{W}{m\cdot K}} + \frac{0{,}005\,m}{0{,}70\,\frac{W}{m\cdot K}} + 0{,}04\,\frac{m^2\cdot K}{W}} = 0{,}198\,\frac{W}{m^2\cdot K} \approx 0{,}200\,\frac{W}{m^2\cdot K}$$

Wand b)
$$U = \frac{1}{0{,}13\,\frac{m^2\cdot K}{W} + \frac{0{,}015\,m}{0{,}70\,\frac{W}{m\cdot K}} + \frac{0{,}425\,m}{0{,}09\,\frac{W}{m\cdot K}} + \frac{0{,}02\,m}{0{,}31\,\frac{W}{m\cdot K}} + 0{,}04\,\frac{m^2\cdot K}{W}} = 0{,}201\,\frac{W}{m^2\cdot K} \approx 0{,}20\,\frac{W}{m^2\cdot K}$$

Berechnung des U-Werts mit Hilfe einer geeigneten Arbeitshilfe

Einschalige KS-Außenwand mit WDVS

	RDK [–]	d [cm]	λ [W/(m·K)]	d/λ [W/(m²·K)]	θ 20,0
Wärmeübergangswiderstand R_{si} =				0,13	19,36
Innenputz		1,0	0,70	0,014	19,29
Kalksandstein	1,8	17,5	0,99	0,177	18,41
Wärmedämmung		15	0,032	4,688	-4,77
Außenputz		0,5	0,70	0,007	-4,80
Wärmeübergangswiderstand R_{se} =				0,04	-5,0

R_{tot} = 5,056

U = **0,198**

Endergebnis: **U = 0,198 W/(m²·K)**

Monolithische Außenwand

	RDK [–]	d [cm]	λ [W/(m·K)]	d/λ [W/(m²·K)]	θ 20,0
Wärmeübergangswiderstand R_{si} =				0,13	19,35
Innenputz		1,5	0,70	0,021	19,24
Mauerwerk	0,6	42,5	0,09	4,722	-4,47
Außenputz		2,0	0,31	0,065	-4,80
Wärmeübergangswiderstand R_{se} =				0,04	-5,0

R_{tot} = 4,978

U = **0,201**

Endergebnis: **U = 0,201 W/(m²·K)**

3.2 Wärmeübergangswiderstände

Die Wärmeübergangswiderstände R_{si} an der inneren und R_{se} an der äußeren Bauteiloberfläche stellen wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U dar. Ihre Bemessungswerte werden in DIN EN ISO 6946 tabelliert und sind abhängig von der Wärmestromrichtung sowie der Bauteilausrichtung.

Für geneigte Bauteile und Dächer mit einer Neigung unter 60° zur Waagerechten werden die Werte für waagerechte, bei größeren Neigungen die Werte für senkrechte Bauteile angesetzt. Die Zuordnung der anzusetzenden Wärmeübergangswiderstände richtet sich nach der baulichen Situation für den Winterfall mit Wärmestrom von innen nach außen (Bild 5). Bei Innenbauteilen der thermischen Gebäudehülle wird beidseitig der Wärmeübergangswiderstand R_{si} verwendet.

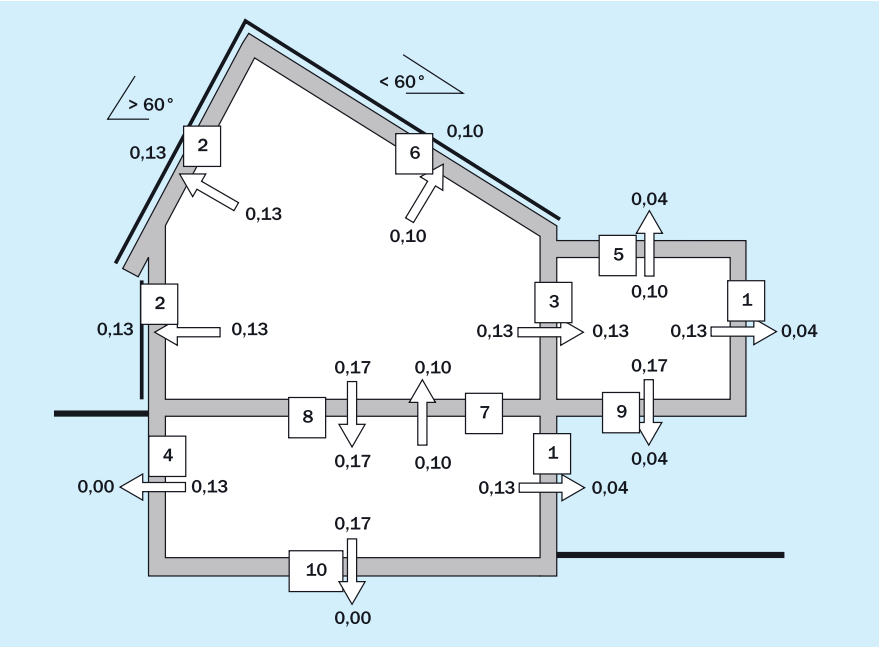


Bild 5 Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände für die Berechnung des U-Werts nach DIN EN ISO 6946 für verschiedene Bauteile (Wärmestromrichtung von innen nach außen). Die Zahlen in den Kästchen verweisen auf die Zeilennummern aus Tafel 6

Tafel 6 Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946, DIN 4108-2 und DIN 4108-3 für den Winterfall (Wärmestromrichtung von innen nach außen)

Zeile	Bauteil	Wärmeübergangswiderstand innen R_{si} [m²·K/W]	Wärmeübergangswiderstand außen R_{se} [m²·K/W]
1	Außenwände (ausgenommen Außenwände aus Zeile 2); nicht hinterlüftete geneigte Dächer mit Neigung ≥ 60°	0,13	0,04
2	Außenwände mit einer hinterlüfteten Bekleidung, Abseitenwände zum ungedämmten Dachraum; hinterlüftete geneigte Dächer mit Neigung ≥ 60°	0,13	0,13
3	Wohnungstrennwände, Treppenhauswände, Wände zwischen unabhängigen Räumen, Trennwände zu dauernd unbeheizten Räumen, Abseitenwände zu gedämmten Dachräumen	0,13	0,13
4	Außenwände, die an das Erdreich grenzen	0,13	0
5	Decken oder geneigte Dächer mit einer Neigung < 60°, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abgrenzen; unbelüftete Flachdächer	0,10	0,04
6	Decken unter Spitzböden und nicht ausgebauten Dachräumen; Decken unter belüfteten Räumen	0,10	0,10
7	Wohnungstrenndecken und Decken zwischen unabhängigen Räumen Wärmestromrichtung nach oben Wärmestromrichtung nach unten	 0,10 0,17	 0,10 0,17
8	Kellerdecken	0,17	0,17
9	Decken, die Räume nach unten gegen Außenluft abgrenzen	0,17	0,04
10	An das Erdreich grenzender unterer Abschluss eines Aufenthaltsraums	0,17	0
11	Nachweis der Schimmelfreiheit (Überprüfung des Schimmelkriteriums f_{Rsi})	0,25	0,04
12	Nachweis des baulichen Feuchteschutzes (Glaser-Verfahren) nach DIN 4108-3	0,10/0,13/0,17 gemäß Zeilen 1 bis 9	0,04

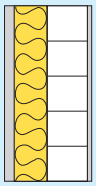
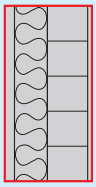
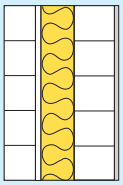
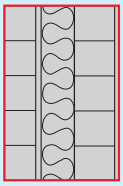
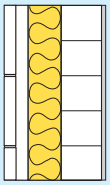
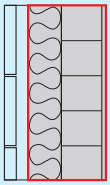
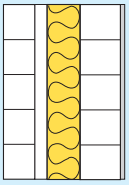
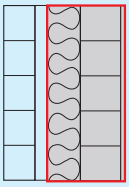
Für die Überprüfung eines Bauteils hinsichtlich Kondensat- oder Tauwasserausfall nach DIN 4108-3 (klimabedingter Feuchteschutz) bzw. DIN 4108-2 Abschnitt 6 (Wärmebrücken) gelten jeweils die dort angegebenen Wärmeübergangswiderstände.
Für Bauteile mit wechselnder Wärmestromrichtung (z.B. bei einer dynamischen Gebäudesimulation für den Sommerfall) oder für Bauteile, deren Einbaulage nicht vorab bekannt ist, wird empfohlen, die Wärmeübergangswiderstände wie für Wände zu verwenden.

Für stark belüftete Luftschichten wie Hinterlüftungsebenen hinter vorgehängten Fassaden oder in zweischaligen Wänden entfallen die außerhalb dieser Schicht liegenden Bauteilschichten bei der U-Wert-Berechnung. Stattdessen wird für R_{se} der Wert für ruhende Luft, also der raumseitige R_{si}-Wert (Tafel 7), angesetzt.

Bei direktem Kontakt zu Feststoffen wie z.B. zwischen der Bodenplattenunterseite und dem Erdreich beträgt der Wärmeübergangswiderstand 0 (Null). Für wechselnde Wärmestromrichtungen oder unbekannte Einbaulagen wird die Verwendung der Werte für senkrechte Wände empfohlen. Für Kondensatrisiko- und Wärmebrückenberechnungen gelten die speziellen Vorgaben aus DIN 4108-2, DIN 4108-3 und DIN 4108 Beiblatt 2.

Zur Beurteilung der reinen Dämmwirkung einer Baustoffschichtenfolge unabhängig von der Wärmestromrichtung bietet sich der Wärmedurchlasswiderstand R anstelle des U-Werts an.

Tafel 7 **Thermisch wirksame Schichten und Wärmeübergangswiderstände verschiedener Außenwandkonstruktionen**

Bauteil	Systemskizze	Thermisch wirksame Schichten	Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}	Luftschicht
KS-Außenwand mit Wärmedämm-Verbundsystem			0,04	0,13	–
Zweischalige KS-Außenwand mit Fingerspalt oder stehender Luftschicht			0,04	0,13	ruhend
Hinterlüftete KS-Außenwand nach DIN 18516-1			0,13	0,13	stark belüftet
Zweischalige KS-Außenwand mit Hinterlüftung nach den Regeln der alten DIN 1053-1			0,13	0,13	stark belüftet

3.3 Wärmemenge, Nutzenergie Wärme bzw. Kälte

Der Wärmetransport durch ein Bauteil lässt sich quantifizieren, indem die transportierte Wärmemenge Q (auch: Φ) auf die Zeitdauer des Transports bezogen wird. Dieser Quotient Q/t ergibt den Wärmestrom $\dot{Q}$ beziehungsweise die Wärmetransportleistung in der Einheit Watt (W). Eine weitere Normierung auf die Bauteilfläche führt zur Wärmestromdichte $\dot{q}$ in W/m².

$$Q = U \cdot A\,(\theta_i - \theta_e) \cdot t \text{ [Wh] oder [kWh]} \qquad (3.5)$$

Der entscheidende Antrieb für den Wärmetransport ist die anliegende Lufttemperaturdifferenz $\Delta\theta$ in Kelvin (K) zwischen den begrenzenden Lufträumen. Wird die Wärmestromdichte $\dot{q}$ zusätzlich auf diese Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ bezogen, so ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient U des Bauteils in der Einheit W/(m²K).

Folglich lässt sich in umgekehrter Richtung aus dem U-Wert, der Bauteilfläche, dem Unterschied der Innen- und Außenlufttemperaturen sowie der Dauer dieses Temperaturunterschieds der resultierende Wärmetransport durch das Bauteil ermitteln.

Summiert man diesen Wärmetransport für alle Hüllflächenbauteile über die gesamte Heizperiode, so erhält man den Netto-Gesamtwärmeverlust, auch als „Nutzenergie Wärme“ bezeichnet. Analog ergibt sich für ein klimatisiertes Gebäude durch Summation über alle Sommerstunden die erforderliche Netto-Kühllast oder „Nutzenergie Kälte“.

3.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Materials ist ein Stoffkennwert, der angibt, wie viel Wärme pro Zeiteinheit durch eine 1 m dicke Schicht des Stoffs mit einer Fläche von 1 m² strömt, wenn die Oberflächentemperaturen beider Seiten einen Unterschied von 1 Kelvin aufweisen (Bild 6). Streng genommen ist die Wärmeleitfähigkeit nicht nur von der Art, Dichte und Struktur des Materials abhängig, sondern variiert auch mit der Temperatur und dem im Material enthaltenen Sorptionsfeuchtegehalt. Im Bauwesen wird die Wärmeleitfähigkeit jedoch unter definierten Bedingungen als Stoffkonstante betrachtet. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit, desto ausgeprägter sind die Dämmeigenschaften des Materials.

Für die Berechnung von Wärmedurchgangskoeffizienten U sind zwingend sogenannte Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit zu verwenden, nicht Messwerte oder Nennwerte. Die Bemessungswerte repräsentieren den langfristigen Gebrauchszustand des Baustoffs im Gebäude unter Berücksichtigung baupraktisch zu erwartender Feuchtegehalte. Sie werden offiziell festgelegt und sind aus Normen, bauaufsichtlichen Zulassungen, Prüfzeugnissen und Klassifizierungen sowie Bauartgenehmigungen ersichtlich. Die Verwendung anderer Wärmeleitfähigkeitswerte wie Mess- oder Nennwerte für die U-Wert-Berechnung stellt einen Pla-

Tafel 8 Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen, nach DIN 4108-4 [3] und DIN EN ISO 10456 [4]

Stoff	Rohdichte[1] ρ [kg/m³]	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Richtwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl[2] μ [–]
1. KS-Mauerwerk und Kalksandstein-Produkte			
1.1. Mauerwerk aus Kalksandsteinen und Mauerwerk aus Kalksandsteinen nach EN 771-2 in Verbindung mit DIN 20000-402	1.400	0,70	5/10
	1.600 1.800 2.000 2.200 2.400 2.600	0,79 0,99 1,1 1,3 1,6 1,8	15/25
1.2 KS-Wärmedämmsteine (Wärmetechnisch optimierte Kalksandsteine)	1.200	0,33	5/10
2. Putze, Mörtel und Estriche aus DIN 4108-4 und Beton aus DIN EN ISO 10456			
2.1 Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk	1.800	1,0	15/35
2.2 Gipsputzmörtel nach DIN EN 13279-1	1.400	0,51	4/10
2.3 Leichtputz	≤ 700 ≤ 1.000 ≤ 1.300	0,25 0,38 0,56	15/20
2.5 Normalmauermörtel NM	1.800	1,2	15/35
2.6 Leichtmauermörtel nach DIN EN 1996-1-1, DIN EN 1996-2	≤ 700 ≤ 1.000	0,21 0,36	15/35
2.7 Dünnbettmörtel DM	1.600	1,0	15/35
2.8 Zement-Estrich	2.000	1,4	15/35
2.9 Anhydritestrich	2.100	1,2	15/35
2.10 Stahlbeton Bewehrungsgrad 1 % Bewehrungsgrad 2 %	 2.300 2.400	 2,3 2,5	 80/130 80/130
3. Sonstige Stoffe			
3.1 Trockene, ruhende Luft	1,23	0,025	1
3.2 Bauglas (Natronglas einschließlich Floatglas)	2.500	1,0	dampfdicht
3.3 Aluminium und Aluminiumlegierungen	2.800	160	≥ 50 µm dampfdicht
3.4 Stahl	7.800	50	≥ 50 µm dampfdicht
3.5 Edelstahl	7.900	17	≥ 50 µm dampfdicht
3.6 Konstruktionsholz	500 700	0,13 0,18	20/50 50/200
3.7 OSB Platten	650	0,13	30/50
3.8 Spanplatten	600	0,14	15/50

4. Wärmedämmstoffe nach DIN 4108-4

	Typischer Rohdichtebereich[3] ρ [kg/m³]	Typische Wärmeleitfähigkeit[3] Nennwert λ_D [W/(m·K)]	Bemessungswert λ_B [W/(m·K)]	Richtwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl[2] μ [–]
4.1 Mineralwolle (MW) nach DIN EN 13162	20 – 200	0,031 – 0,034	0,032 – 0,035	1
4.2 Expandiertes Polystyrol (EPS) n. DIN EN 13163	15 – 30	0,031 – 0,034	0,032 – 0,035	20/100
4.3 Extrudiertes Polystyrol (XPS) nach DIN EN 13164	20 – 45	0,034 – 0,039	0,035 – 0,040	80/250
4.4 Polyurethan-Hartschaum (PUR) nach DIN EN 13165[3]	30 – 100	0,021 – 0,029	0,022 – 0,030	40/200
4.5 Phenolharz-Hartschaum (PF) nach DIN EN 13166	40	0,021 – 0,023	0,022 – 0,024	10/60
4.6 Schaumglas (CG) nach DIN EN 13167	90 – 220	0,047 – 0,053	0,048 – 0,055	dampfdicht
4.7 Holzwolle-Leichtbauplatten (WW) nach DIN EN 13168	350 – 600	0,060 – 0,10	0,063 – 0,105	2/5
4.8 Blähperlit (EPB) nach DIN EN 13169	90 – 490	0,045 – 0,070	0,046 – 0,072	5
4.9 Expandierter Kork (ICB) nach DIN EN 13170	10 – 220	0,040 – 0,055	0,042 – 0,058	5/10
4.10 Holzfaserdämmstoff (WF) nach DIN EN 13171	30 – 230	0,032 – 0,060	0,034 – 0,063	5

[1] Die bei den Steinen genannten Rohdichten sind die oberen Grenzwerte aus den Produktnormen.
[2] Beim Nachweis des klimabedingten Feuchteschutzes ist jeweils der für die Baukonstruktion ungünstigere Wert einzusetzen. Anwendung der μ-Werte und Berechnungsverfahren siehe DIN 4108-3.
[3] Werte marktüblicher Produkte [6]

nungsfehler dar. Die korrekte Verwendung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit ist essentiell für eine realistische Bewertung der Wärmedämmeigenschaften von Bauteilen und die Einhaltung bauphysikalischer Anforderungen. Sie stellen sicher, dass die tatsächlichen Bedingungen im Gebäude angemessen berücksichtigt werden.

Eine Auswahl von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe sowie Richtwerte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl sind in Tafel 8 aufgeführt.

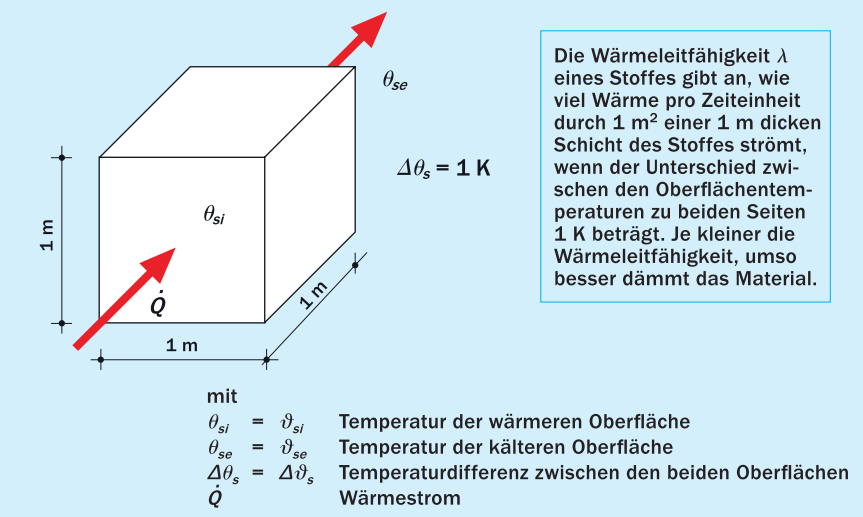


Bild 6 **Wärmeleitfähigkeit**

3.4.1 Wärmeleitfähigkeit von KS-Mauerwerk nach harmonisierten europäischen Normen

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk aus Kalksandsteinen, inklusive des Mörteleinflusses, sind in der Norm DIN 4108-4 tabelliert und können direkt den dortigen Angaben entnommen werden. Eine weitere Umrechnung durch den Planer ist nicht erforderlich.

Bei KS-Wärmedämmsteinen werden die Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,dry,unit}$ in der Leistungserklärung deklariert. Für die wärmeschutztechnische Anwendung müssen diese Mittelwerte noch in den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit umgerechnet werden. In der Praxis geben die Hersteller von KS-Wärmedämmsteinen üblicherweise direkt den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit an, sodass auch hier keine weitere Umrechnung durch den Planer notwendig ist. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von KS-Wärmedämmsteinen beträgt in der Regel 0,33 W/(mK).

INFO

Die Bemessungswerte für Mauerwerk aus Kalksandsteinen sind in DIN 4108-4 tabelliert und können unmittelbar verwendet werden, ohne dass eine Umrechnung durch den Planer erforderlich ist.

3.4.2 Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

Nenn- und Bemessungswert

Bei Dämmstoffen wird der Nennwert λ_D der Wärmeleitfähigkeit („declared value“ mit Index „D“ für declared) an frischem, trockenem Material vom Hersteller ermittelt und in der Leistungserklärung sowie auf dem Dämmstoffetikett deklariert. Für die praktische Anwendung ist jedoch der langjährige Gebrauchs- und Feuchtezustand, abhängig von der Lage im Bauteil und dem Standort in Europa, maßgeblich. Dieser wird durch den sogenannten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit repräsentiert, welcher zwingend für wärmeschutztechnische Bemessungen zu verwenden ist.

Der Unterschied zwischen Nenn- und Bemessungswert wird durch einen additiven Zuschlag ausgeglichen, der je nach Material variiert und insbesondere von der Hygroskopizität des Dämmmaterials abhängt. Für Deutschland sind diese Zuschläge in DIN 4108-4 festgelegt, basierend auf umfangreichen Studien und Auswertungen von mehr als 10.000 Messwerten verschiedener Produkte. Tafel 9 stellt die Umrechnung vom Nenn- zum Bemessungswert nach DIN 4108-4 dar und gibt typische Wertebereiche der Nenn- und Bemessungswerte für unterschiedliche Dämmstoffe an.

Der Hersteller kann, muss aber nicht zwingend den Bemessungswert auf dem Dämmstoffetikett und in den technischen Datenblättern angeben. Der Nennwert muss in jedem Fall deklariert werden. Ist der Bemessungswert angegeben, kann er direkt übernommen werden. Andernfalls muss der Planer den Bemessungswert selbst aus dem Nennwert unter Verwendung des Zuschlags aus DIN 4108-4 bestimmen. Für die Berechnung des U-Werts ist stets der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit maßgeblich. Die Verwendung des Nennwerts für diese Berechnung stellt einen Planungsfehler dar.

Perimeterdämmungen

Bei Perimeterdämmungen, die außerhalb der Bauwerksabdichtung angebracht sind und ständig mit Erdreich, Feuchtigkeit, Niederschlagswasser und teilweise Grundwasser in Kontakt stehen, sind zusätzliche Aspekte zu beachten. Unter diesen Bedingungen müssen die Dämmstoffe hohe Anforderungen erfüllen und sind in Normen oder bauaufsichtlichen Dokumenten geregelt. Außer bei Schaumglas muss der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit feuchtekorrigiert werden, um den Feuchteeinfluss auf die Dämmwirkung zu berücksichtigen. Dies ist in DIN 4108-2 und den jeweiligen Zulassungen oder Bauartgenehmigungen beschrieben.

Unter tragenden Gründungsplatten dürfen nur spezielle, für Dauerdruckbelastung zugelassene Qualitäten von Schaumglas, XPS-Hartschaum und EPS-Hartschaum eingesetzt werden. Unter Streifenfundamenten ist keine Dämmung zulässig. Die senkrechte und waagerechte Perimeterdämmung kann lückenlos ineinander übergehen, wodurch das Prinzip der „durchgehenden Dämmebene“ zur Verminderung von Wärmebrücken bei Neubauten gut eingehalten werden kann. Dies führt zu deutlich geringeren Wärmeverlusten als bei unterbrochenen Dämmebenen.

Tafel 9 **Umrechnung von Nenn- zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von europäisch harmonisierten Dämmstoffen (Dämmstoffe mit CE-Zeichen) nach DIN 4108-4 [3]**

Dämmstoffe bzw. Dämmschichten in Mehrschichtplatten	Umrechnungsfaktor vom Nennwert λ_D auf Bemessungswert λ_B	Mindestzuschlag (resultierender Mindestzuschlag) [W/(m·K)]	Wertebereich für Nennwert λ_D [W/(m·K)]	Wertebereich für Bemessungswert λ_B [W/(m·K)]	Zeilennummern in DIN 4108-4, Tabelle 2
Nicht-hygroskopische Dämmstoffe: ■ Mineralwolle ■ EPS ■ XPS ■ PU ■ PF-Schaum ■ Schaumglas ■ Blähperlit	$\lambda_B = 1{,}03 \cdot \lambda_D$	0,001	0,020–0,070	0,021–0,072	5.1–5.6, 5.8, 5.13, 5.14, 5.17
Hygroskopische Dämmstoffe: ■ Holzfaser ■ Holzwolle ■ Blähton	$\lambda_B = 1{,}05 \cdot \lambda_D$	0,002	0,032–0,13	0,034–0,14	5.7.1, 5.10, 5.15
PU-Ortschaum PIR-Ortschaum	$\lambda_B = 1{,}10 \cdot \lambda_D$	0,003	0,020–0,040	0,023–0,044	5.12, 5.19
Holzwolle-Deckschicht in Holzwolle-mehrschichtplatten ■ Vermiculit ■ PE-Schaum	$\lambda_B = 1{,}20 \cdot \lambda_D$	(0,007)	0,035–0,14	0,042–0,17	5.7.2, 5.16, 5.18
Expandierter Kork	$\lambda_B = 1{,}23 \cdot \lambda_D$	(0,009)	0,040–0,055	0,049–0,068	5.9

3.5 Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten

Luftschichten und Luftspalte

Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U eines Bauteils sind nicht nur die Wärmedurchlasswiderstände der Materialschichten, sondern auch der innenliegenden Luftschichten zu berücksichtigen (Tafel 10). Die Norm DIN EN ISO 6946 differenziert hierbei Lufträume in Bauteilen nach ihren Abmessungen und unterteilt sie in:

- Luftschichten, deren Breite und Länge jeweils mehr als das Zehnfache der in Wärmestromrichtung gemessenen Dicke betragen. Diese werden weiter unterteilt in:
  - Ruhende Luftschichten
  - Schwach belüftete Luftschichten
  - Stark belüftete Luftschichten
- Luftspalten, deren Breite oder Länge mit der Dicke vergleichbar sind.

Tafel 10 **Bemessungswerte des Wärmedurchlasswiderstandes *R* und der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} von ruhenden Luftschichten nach DIN EN ISO 6946, für angrenzende Oberflächen aus üblichen Baustoffen (Emissionskoeffizienten ε = 0,9 beider angrenzenden Oberflächen)**

Dicke der Luftschicht	Richtung des Wärmestroms					
	aufwärts		horizontal		abwärts	
[mm]	*R* [m²·K/W]	λ_{eq} [W/(m·K)]	*R* [m²·K/W]	λ_{eq} [W/(m·K)]	*R* [m²·K/W]	λ_{eq} [W/(m·K)]
0	0,00	–	0,00	–	0,00	–
5	0,11	0,045	0,11	0,045	0,11	0,045
7	0,13	0,054	0,13	0,054	0,13	0,054
10	0,15	0,067	0,15	0,067	0,15	0,067
15	0,16	0,094	0,17	0,082	0,17	0,082
25	0,16	0,16	0,18	0,14	0,19	0,13
50	0,16	0,31	0,18	0,28	0,21	0,24
100	0,16	0,63	0,18	0,56	0,22	0,45
300	0,16	1,88	0,18	1,67	0,23	1,30
Für Luftschichtdicken zwischen den angegebenen Werten darf linear interpoliert werden.						

Sehr schmale Luftspalten in Wärmestromrichtung, die grundsätzlich bei einem bestimmten Baustoff auftreten, wie beispielsweise die unvermörtelten Stoßfugen zwischen Mauersteinen, werden nicht gesondert erfasst, sondern sind bereits in den Wärmeleitfähigkeitswerten des Mauerwerks enthalten.

Luftschichten

Die Unterscheidung der Luftschichten nach ihrer Belüftung erfolgt gemäß folgender Kriterien:

- Ruhende Luftschicht (z.B. Fingerspalt in zweischaligem Mauerwerk mit Kerndämmung): Abgeschlossen von der Umgebung, Querschnitt eventuell vorhandener Öffnungen zur Außenluft

≤ 5 cm² pro Meter Länge, kein Luftstrom möglich. Die Wärmedurchlasswiderstände ruhender Luftschichten sind in DIN EN ISO 6946 tabelliert und berücksichtigen neben der Wärmeleitung auch Wärmestrahlung und Eigenkonvektion. Für Berechnungsprogramme, die nur Wärmeleitfähigkeiten akzeptieren, kann eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit aus Dicke und Wärmedurchlasswiderstand abgeleitet werden mit $\lambda_{eq,i} = d/R_i$ (3.6). Bemessungswerte für verschiedene Luftschichtdicken und Wärmestromrichtungen sind in Tafel 10 angegeben.

- Stark belüftete Luftschicht (z.B. Hinterlüftungsebenen in zweischaligen Wänden oder hinter vorgehängten Fassaden): Querschnitt der Öffnungen > 15 cm² pro Meter Länge. Solche Luftschichten und alle außerhalb liegenden Schichten entfallen bei der U-Wert-Berechnung. Stattdessen wird für R_{se} der Wert für ruhende Luft R_{si} angesetzt.

3.6 U-Wert von Bauteilen aus homogenen und inhomogenen Schichten

Bei Bauteilen, die aus homogenen und inhomogenen Schichten bestehen oder unterschiedliche nebeneinanderliegende Bereiche aufweisen (z.B. Sparren und Gefache bei Dachstühlen, Betonstützen in Mauerwerkswänden), muss zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U das sogenannte „vereinfachte Verfahren“ nach DIN EN ISO 6946 angewendet werden. Die früher übliche flächenanteilige Mittelung der U-Werte nebeneinanderliegender Bereiche ist nicht mehr zulässig und stellt einen Planungsfehler dar, da sie zu ungenauen und zu günstigen U-Werten führt.

Die Berechnung des U-Werts eines zusammengesetzten Bauteils oder eines Bauteils aus homogenen und inhomogenen Schichten nach DIN EN ISO 6946 erfolgt zweckmäßigerweise mit einer Tabellenkalkulation oder einem Berechnungsprogramm. Obwohl das vereinfachte Verfahren der Norm auf den ersten Blick komplex erscheint, ist es erheblich vereinfacht im Vergleich zu einer genauen zwei- oder dreidimensionalen Wärmebrückenberechnung, die ansonsten zur Bestimmung des U-Werts erforderlich wäre. Das vereinfachte Verfahren ist jedoch nicht anwendbar, wenn die Dämmschichten eine Wärmebrücke aus Metall enthalten oder nebeneinanderliegende Bereiche sehr unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen (z.B. Betonstützen zwischen Wärmedämmung).

Für eine noch präzisere Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten können numerische Verfahren nach DIN EN ISO 10211 eingesetzt werden. Solche computergestützten Berechnungen sind auch zur Bestimmung der Oberflächentemperaturen an Wärmebrücken und somit zur Bewertung des Kondensat- und Schimmelrisikos erforderlich.

3.7 U-Wert-Korrekturen für Luftspalte, Befestigungsmittel und Umkehrdächer

Die Norm DIN EN ISO 6946 adressiert die Berücksichtigung von Wärmebrücken und anderen Einflüssen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten U bei der Berechnung. Luftspalten zwischen Dämmplatten, beispielsweise bei mangelhafter Verlegung eines Wärmedämm-Verbundsystems (WDVS), sowie Befestigungsmittel wie Schrauben und Dübel, die die Dämmebene durchdringen, erhöhen den Wärmeverlust und müssen im U-Wert berücksichtigt werden, um eine Unterschätzung zu vermeiden. Gleiches gilt bei Umkehrdächern für den Anteil des Niederschlags, der zwischen Dämmplatte und Abdichtung abläuft und dort Wärme abtransportiert.

Die Norm liefert folgende Formel zur Korrektur des U-Werts um diese Einflüsse:

$$U_c = U + \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad [\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}] \qquad (3.7)$$

wenn $(\Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r) \geq 0{,}03 \cdot U$

mit U_c korrigierter U-Wert unter Berücksichtigung von Luftspalten, Befestigern und Regenwasserunterlauf bei Umkehrdächern

U U-Wert vor den Korrekturen („ungestörter“ U-Wert)

ΔU_g, ΔU_f, ΔU_r U-Wert-Erhöhung durch Luftspalten in der Dämmebene (Index „g“ für gaps), Befestigungselemente (Index „f“ für fastener), Unterlaufen einer Umkehrdämmung durch Regenwasser (Index „r“ für rain)

Für die Anwendung der drei Korrekturen in Deutschland sind die nachfolgenden Aspekte zu beachten.

3.7.1 Einfluss von Luftspalten in der Dämmebene

Hinsichtlich des Einflusses von Spalten werden drei Korrekturstufen unterschieden:

- In der Planung darf davon ausgegangen werden, dass die spätere Ausführung fachgerecht und größtenteils spaltenfrei erfolgt, sodass der Einfluss ΔU_g von Spalten auf den Wärmedurchgang vernachlässigbar ist. Ebenso vernachlässigbar ist der Einfluss von Spalten bis zu 5 mm Dicke, ausgefüllten breiteren Spalten oder Spalten zwischen Dämmplatten mit Nut-und-Feder-Verbindungen.

- Sind im Bestandsgebäude oder im Schadensfall nicht nur vereinzelte Spalten zwischen den Dämmplatten oder zwischen der Dämmung und den Sparren vorhanden, die mehr als 5 mm breit sind und komplett über die Dämmschichtdicke durchgehen, beträgt der Zuschlag ΔU_g = 0,01 W/(m²K).

- Können diese Spalten zusammen mit anderen Hohlräumen zu einer freien Luftzirkulation zwischen der warmen und der kalten Seite der Dämmschicht führen, erhöht sich der Zuschlag auf ΔU_g = 0,04 W/(m²K).

- Stellt die Dämmschicht, die die Spalte enthält, nicht den Hauptanteil des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands des Bauteils dar, beispielsweise bei mehrlagigen Dämmschichten und Spalten nur in einer der Schichten, wird ΔU_g noch um den multiplikativen Faktor $(R_{\text{Schicht mit Spalten}}/R_{tot})^2$ abgemindert.

3.7.2 Einfluss von Befestigungsmitteln, die die Dämmebene oder die Luftschicht durchdringen

Die Berücksichtigung des Einflusses ΔU_f von punktförmigen Befestigungsmitteln auf den Wärmedurchgang berücksichtigt verschiedene Szenarien hinsichtlich der Art und Anzahl der Befestigungsmittel sowie deren Wärmeleitfähigkeit. Dafür wird der zusätzliche Wärmedurchgang durch punktförmige mechanische Befestigungsmittel wie Dübel und Schrauben, die die Dämmschicht durchdringen, sowie andere punktförmige Wärmebrücken numerisch als punktförmiger Wärmedurchgangskoeffizient χ bestimmt.

- Besitzt das Befestigungsmittel eine bauaufsichtliche Zulassung, die den χ-Wert festlegt, wird der Befestigereinfluss für das konkrete Bauteil über die mittlere Befestigeranzahl n pro Quadratmeter bestimmmt: $\Delta U_f = n \cdot \chi$.
- Liegt für einen Befestiger kein χ-Wert vor, kann stattdessen die Näherungsformel aus DIN EN ISO 6946:2018-03, Abschnitt F.3.2, für den Befestigereinfluss verwendet werden.
- Der Einfluss von Mauerwerksankern zwischen Tragschale und Vormauerung ist generell so gering, dass er komplett vernachlässigt wird.
- Ebenfalls vernachlässigt wird der Befestigereinfluss, wenn die Wärmeleitfähigkeit eines Teils oder des gesamten Befestigungsteils kleiner als 1 W/(m·K) ist, beispielsweise wenn ein Teil des Ankers aus Kunststoff besteht.
- Für Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) legt die Zulassung des WDVS detailliert fest, bis zu welcher Dübelanzahl pro m² der Dübeleinfluss im U-Wert unberücksichtigt bleiben darf, je nach Dübelklasse, Dämmmaterial und Dämmdicke. Zur Orientierung: Bei Dübeln der Dübelklasse 0,001 liegt diese Schwelle bei WDVS mit 15 bis 20 cm Dicke bei etwa 5 bis 6 Dübeln pro m², bei Dübelklasse 0,002 bei etwa 2 bis 3 Dübeln pro m². Der Einfluss von Dübeln der Dübelklasse 0 ist so gering, dass die Verdübelung als wärmebrückenfrei gilt und die Dübel, unabhängig von ihrer Anzahl pro m², unberücksichtigt bleiben.

3.7.3 Einfluss des Unterlaufens der Dämmung bei Umkehrdächern durch Regenwasser

- Die Korrektur ΔU_r für das Unterlaufen einer Umkehrdämmung durch Regenwasser erfolgt in Deutschland nicht mit der Formel in DIN EN ISO 6946, sondern nach der Festlegung in der jeweiligen Zulassung des Dämmstoffs für das Umkehrdach.
- Ist dort nichts ausgeführt, bestimmt sich laut DIN 4108-2 der Zuschlag ΔU_r gemäß Tafel 11.

Tafel 11 Einfluss des Unterlaufens der Dämmung bei Umkehrdächern durch Niederschlag [5]

UK-Dämmstoff (oberhalb der Abdichtung) ist …Prozent des gesamten Wärmedurchlasswiderstands des Daches	Zuschlag ΔU_r für Regeneinfluss
> 90 %	+ 0,05 W/(m²K)
50 % bis 90 %	+ 0,03 W/(m²K)
< 50 %	+ 0,00 W/(m²K)

4. Hygienischer Mindestwärmeschutz

Der bauliche Wärmeschutz von Gebäuden ist von zentraler Bedeutung, um ein hygienisches Raumklima für die Bewohner beziehungsweise Nutzer zu gewährleisten und die Baukonstruktion vor Feuchteschäden zu schützen. Dementsprechend sind Gebäude so zu planen und auszuführen, dass ein ausreichender Mindestwärmeschutz sowohl für flächige Bauteile als auch an Wärmebrücken sichergestellt ist. Die einzuhaltenden Mindestanforderungen sind in der bauaufsichtlich eingeführten technischen Baubestimmung DIN 4108-2 festgelegt. Sie gelten für alle Außenbauteile von direkt oder indirekt über Raumverbund beheizten oder beheizbaren Räumen, die auf übliche Innentemperaturen von ≥ 12 °C beheizt werden bzw. beheizt werden können.

4.1 Mindestwärmeschutz flächiger Bauteile bei normal beheizten Gebäuden

Die Festlegungen der DIN 4108-2 zu Mindestwärmedurchlasswiderstand für Außenbauteile sind:

- Eine gleichmäßige Beheizung und ausreichende Belüftung des Gebäudes ist grundsätzlich gefordert.
- Der Mindestwärmeschutz muss überall, insbesondere an wärmeschutztechnisch geschwächten Querschnitten, eingehalten werden
- Seit der Normausgabe 2025 gilt der Mindestwärmeschutz von Bauteilen ≥ 100 kg/m² alternativ als eingehalten, wenn rechnerisch eine Mindest-Innenoberflächentemperatur „fern“ von Wärmebrücken (≥ 1 m Abstand) von 17 °C nachgewiesen wird (und natürlich weiterhin näher als 1 m an Wärmebrücken von 12,6 °C bzw. $f_{Rsi} \geq 0{,}70$).
- Leichte nichttransparente Bauteile mit < 100 kg/m² müssen grundsätzlich einen erhöhten Wärmeschutz von mindestens $R \geq 1{,}75$ m²K/W aufweisen.
- Für thermisch inhomogene, nichttransparente Bauteile z.B. in Skelett-, Rahmen- oder Holzständerbauweise gilt insgesamt ein Mindestwärmedurchlasswiderstand von $(\frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}) \geq 1{,}0$ m²K/W, und im Gefach von R ≥ 1,75 m²K/W.
- Bei transparenten und teiltransparenten Bauteilen müssen opake Ausfachungen und Paneele mindestens $R \geq 1{,}2$ m²K/W ($U_p \leq 0{,}73$ W/(m²K)) und Rahmen maximal $U_f \leq 2{,}9$ W/(m²K)

Tafel 12 Mindestwerte des Wärmedurchlasswiderstands flächiger Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse ≥ 100 kg/m², aus DIN 4108-2:2025 [5]

Spalte	1	2	3
Zeile	**Bauteile**	**Beschreibung**	**Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils[1] R_{min} in m²·K/W**
1	**Wände**		
1.1	**beheizter Räume**	gegen Außenluft, Erdreich, Tiefgaragen, nicht beheizte Räume (auch nicht beheizte Dach- und Kellerräume sowie nicht beheizte Treppenräume)	1,2
1.2	**niedrig beheizter Räume**		0,55
2	**Dachschrägen**	gegen Außenluft	1,2
3	**Decken nach oben und Flachdächer**		
3.1		gegen Außenluft	1,2
3.2		zu belüfteten Räumen zwischen Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen	0,90
3.3		zu nicht beheizten Räumen, zu bekriechbaren oder noch niedrigeren Räumen	0,90
3.4		zu Räumen zwischen gedämmten Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen	0,35
4	**Decken nach unten**		
4.1		gegen Außenluft, gegen Tiefgarage, gegen Garagen (auch thermisch konditionierte), Durchfahrten (auch verschließbare) und belüftete Kriechkeller[2]	1,75
4.2		gegen nicht beheizten Kellerraum	0,90
4.3		unterer Abschluss (z.B. Sohlplatte) von beheizten Räumen unmittelbar an das Erdreich grenzend bis zu einer Raumtiefe von 5 m	
4.4		über einem nicht belüfteten Hohlraum, z.B. Kriechkeller, an das Erdreich grenzend	
5	**Bauteile zwischen thermisch konditionierten Räumen**		
5.1		Wohnungs- und Gebäudetrennwände, Trennwände von thermisch konditionierte Treppenräumen	0,07
5.2		Wohnungstrenndecken, Decken zwischen Räumen unterschiedlicher Nutzung	0,35
6	**Alternativer Nachweis über die Innenoberflächentemperatur**		
6.1		Alle Bauteile (die Anforderung f_{Rsi} ≥ 0,70 im Bereich der Wärmebrücken bleibt bestehen)	$\theta_{si,min}$ ≥ 17,0 °C im Abstand von ≥ 1 m von der Innenkante von Wärmebrücken

[1] Bei erdberührten Bauteilen: konstruktiver Wärmedurchlasswiderstand
[2] Vermeidung von Fußkälte

aufweisen. Alle Gläser müssen mindestens als Isolierglas oder mit mindestens zwei Glasscheiben ausgeführt sein.

- Die Mindestanforderung von R ≥ 0,90 m²K/W für Sohlplatten und erdberührte Kellerfußböden unter beheizten Aufenthaltsräumen gilt nur für die äußeren 5 m. Der Mittelbereich kann ungedämmt bleiben, da sich dort ein „Wärmesee“ ausbildet.

Tafel 12 listet die Mindestwärmedurchlasswiderstand auf für mittelschwere und schwere Außenbauteile mit Flächenmassen ≥ 100 kg/m².

4.2 Vermeiden von Schimmelpilzwachstum durch ausreichenden Wärmeschutz

Die Vermeidung von Schimmelpilzwachstum auf Innenoberflächen von Bauteilen erfordert nicht nur die Gewährleistung der Kondensatfreiheit der Konstruktion, sondern auch die Vermeidung einer kritischen Luftfeuchte von mehr als 80 % relativer Feuchte unmittelbar an der Bauteiloberfläche. Ab dieser oberflächennahen Luftfeuchte kann es zur Kapillarkondensation von Wasser in den feinen Kapillaren des Baustoffs kommen. Diese Kapillarkondensation liefert bereits eine für Schimmelpilzwachstum ausreichende Menge an Wasser, ohne dass flüssiges Wasser als Oberflächenkondensat auf der Bauteiloberfläche vorhanden sein muss.

Basierend auf vereinfachenden bauphysikalischen Modellbetrachtungen kann Schimmelpilzwachstum auftreten, wenn an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen die relative Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche einen Wert von mehr als 80 % aufweist und dieser Zustand jeweils mindestens 12 Stunden pro Tag gegeben ist. Bei höheren Luftfeuchten sind kürzere Zeiträume für Schimmelpilzwachstum ausreichend.

INFO

Die funktionsgetrennte Kalksandsteinbauweise bietet das bauphysikalische Optimum.

Schimmelpilze benötigen für ihr Wachstum einen Nährboden (Substrat) mit passendem pH-Wert sowie moderate Temperaturen und ausreichend Feuchte. Die genauen Wachstumsgrenzen variieren geringfügig zwischen den verschiedenen Schimmelpilzarten. Da in beheizten Gebäuden in der Regel eine geeignete Temperatur und ein passendes Substrat vorhanden sind, bleibt als Maßnahme zur Schimmelvermeidung lediglich die Vermeidung von Oberflächenfeuchte und Kapillarkondensation (Bild 8).

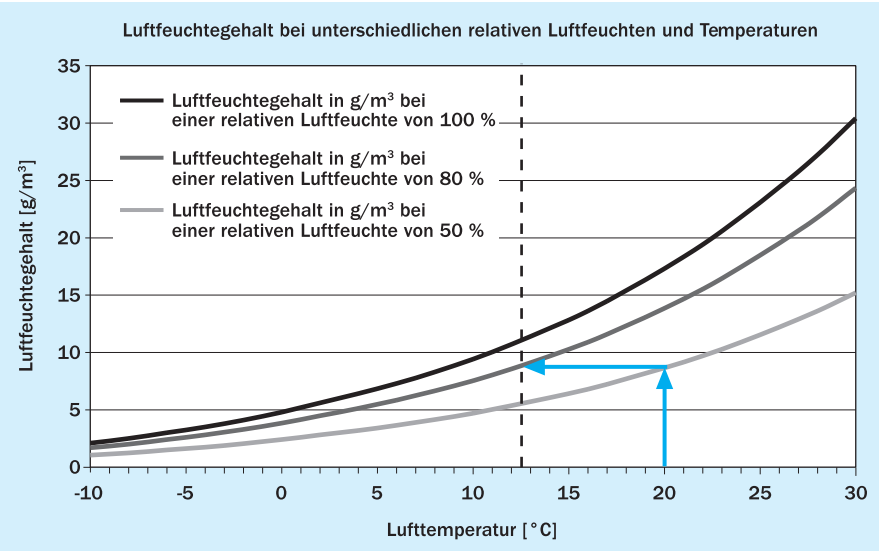


Bild 8 **Zusammenhang zwischen Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte (r.F.) und Luftfeuchtegehalt in g Luftfeuchte pro m³ Luft. Blaue Pfeile: Bei Abkühlung von Luft von 20 °C auf 12,6 °C (z. B. an der Wandoberfläche) steigt die relative Luftfeuchte von 50 % auf 80 %**

Bei Fenstern und vergleichbaren Abschlüssen sind oberflächennahe Luftfeuchten über 80 % und sogar kurzzeitiger Kondensatniederschlag zulässig, da Fensterbaustoffe keine Kapillaren aufweisen und ein zeitweiser Kondensatniederschlag an Fenstern technisch unvermeidbar ist. Für die Einbaufuge des Fensters bzw. des Abschlusses gilt diese Ausnahme allerdings nicht, dort muss unverändert $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ gegeben sein.

5. Wärmeschutz und Schimmelvermeidung bei Wärmebrücken

Wärmebrücken sind Stellen in der thermischen Gebäudehülle, an denen ein örtlich erhöhter Wärmedurchgang durch die Konstruktion auftritt. Daraus resultieren lokale Unterschiede in den Temperaturen der Innen- und Außenoberflächen. Im Winter führen Wärmebrücken zu erhöhten Wärmeverlusten und können aufgrund deutlich erniedrigter Innenoberflächentemperaturen zu einer oberflächennahen Luftfeuchte von über 80 % sowie Tauwasser- und Schimmelbildung beitragen. Aus energetischen, bauqualitätsbezogenen und hygienischen Gesichtspunkten sind Wärmebrücken daher zu vermeiden oder in ihrem Einfluss möglichst zu begrenzen.

Mit steigendem Dämmniveau gewinnen Wärmebrücken bei der energetischen Bewertung von Gebäuden zunehmend an Bedeutung: Bei verbesserter Wärmedämmung sinken die Wärmeverluste der Bauteilflächen in der Regel schneller als die Wärmeverluste im Bereich der Wärmebrücken. Dadurch steigt der prozentuale Anteil der Wärmebrücken am Gesamtwärmeverlust, obwohl beide Anteile unterschiedlich schnell abnehmen.

INFO

Mit zunehmender Wärmedämmung kommt der Planung und Verminderung von Wärmebrücken eine wachsende Bedeutung zu.

Wärmebrücken lassen sich unterscheiden in:

- Stofflich bedingte Wärmebrücken: Ergeben sich aus einem Wechsel der Baustoffe nebeneinanderliegender Bereiche, z.B. Betonstützen in einer monolithischen Mauerwerkswand oder Fenster in der Mauerwerkslaibungen (linienförmig, 2D-berechenbar) oder bei Durchdringungen der Dämmschicht durch Verankerungen (punktförmig, 3D-berechenbar.
- Geometrisch bedingte Wärmebrücken: Linienförmige Wärmebrücken an Stellen, wo angrenzende Bauteile unterschiedliche Orientierungen aufweisen, z.B. an Gebäudekanten, Traufen, Ortgängen oder Wandanschlüssen an Bodenplatten.

Häufig sind Wärmebrücken sowohl stofflich als auch geometrisch bedingt. Wärmebrücken lassen sich nicht vollständig vermeiden, jedoch kann ihre Auswirkung durch geschickte Planung deutlich vermindert werden. Generell wird empfohlen, die dämmende Schicht möglichst vollständig und lückenlos um das beheizte Gebäudevolumen zu legen und die dämmenden Schichten benachbarter Bauteile lückenlos und ohne Dickenänderungen aneinander anzuschließen.

Das Konstruktionsprinzip der durchgehenden Dämmebene lässt sich bei Neubauten mit Kalksandstein und vorausschauender Planung gut umsetzen.

5.1 Energetische Charakterisierung von Wärmebrücken

In energetischer Hinsicht werden linienförmige Wärmebrücken durch den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ in W/(m·K) charakterisiert. Dieser gibt den zusätzlichen Wärmedurchgang pro Stunde, pro Meter Länge der Wärmebrücke und pro Kelvin Lufttemperaturdifferenz an, der über den Wärmedurchgang (ohne Wärmebrücke) durch die benachbarten flächigen Bauteile hinausgeht. Der ψ-Wert ist somit das längenbezogene Pendant zum U-Wert der flächigen Bauteile. Für punktförmige Wärmebrücken wird der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient χ in W/K verwendet.

Zur Bestimmung von ψ wird zunächst mittels einer zweidimensionalen numerischen Berechnung der stationäre Wärmestrom im gesamten Bereich der Wärmebrücke ermittelt und durch die angesetzte Temperaturdifferenz geteilt. Dies ergibt den thermischen Leitwert L in W/K, der formal dem Transmissionswärmetransferkoeffizienten H_T flächiger Bauteile entspricht. Hiervon werden die Wärmetransferkoeffizienten $U_1 \cdot A_1$ und $U_2 \cdot A_2$ der beiden angrenzenden flächigen „Regelbauteile“ abgezogen, soweit ihre Flächen A_1 und A_2 im berechneten Modell enthalten sind. Übrig bleibt der anteilige Wärmetransferkoeffizient, der im Bereich der Wärmebrücke zusätzlich zum „ungestören“ Wärmedurchgang durch die Bauteilflächen auftritt – geteilt durch die Länge der Wärmebrücke erhält man den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ.

Längenbezogene Wärmebrücken treten an allen Anschlussstellen zwischen zwei benachbarten Bauteilen auf. Je nach Bauweise können sie sich deutlich bemerkbar machen, insbesondere wenn keine Maßnahmen zur Verminderung der Wärmebrückenwirkung ergriffen wurden (Bild 9).

Die Bilder 10 und 11 vergleichen die Wärmeströme im Bereich einer einbindenden Decke zwischen einer Kalksandstein-Funktionswand mit Wärmedämmverbundsystem und einer monolithischen Bauweise. Bei der Funktionswand ist eine gleichmäßigere und geringere Wärmestromdichte erkennbar, die sich in einem niedrigen ψ-Wert ausdrückt. Tatsächlich ist die Wärmebrückenwirkung bei einbindenden Bauteilen in Außenwänden mit durchgehender Dämmschicht > 10 cm ($R \geq 2{,}5$ m²K/W) so gering, dass sie auch in der Bagatell-Liste in DIN 4108 Beiblatt 2 Abschnitt 5.5 enthalten ist, in

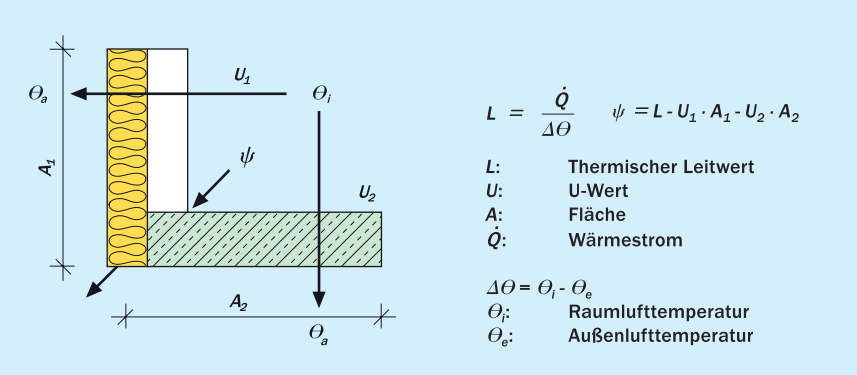


Bild 9 Skizze zur Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ

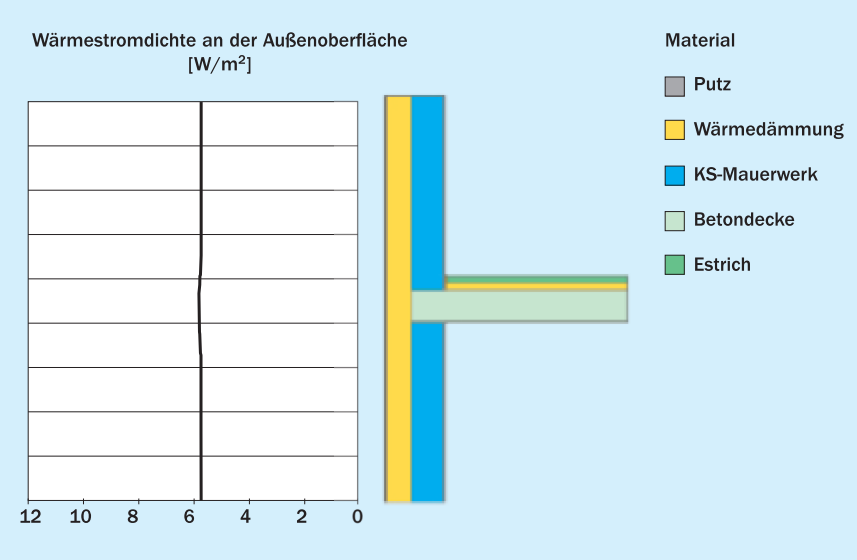


Bild 10 Wärmestromdichten (nach links abgetragen) an der Außenoberfläche bei KS-Funktionswand mit WDVS im Bereich der einbindenden Decke

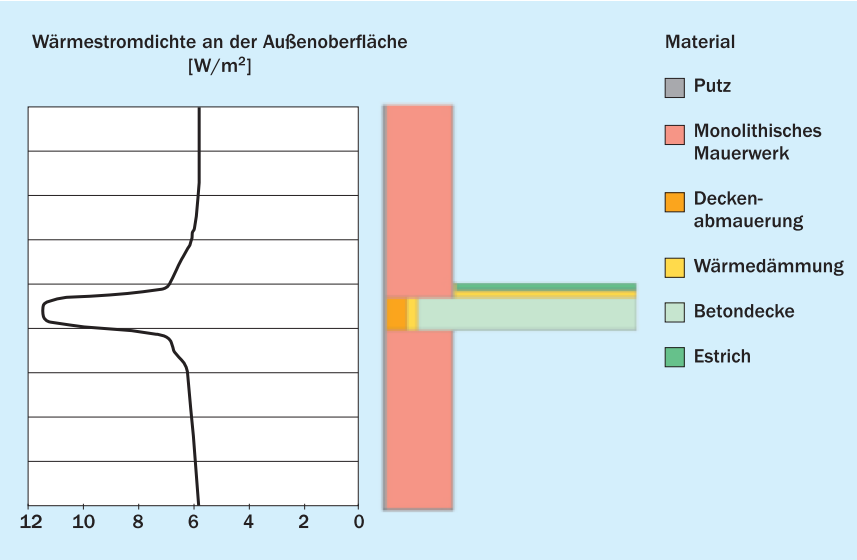


Bild 11 Wärmestromdichten (nach links abgetragen) an der Außenoberfläche bei monolithischer Bauweise im Bereich der einbindenden Decke

der jene Bauteilanschlüsse aufgeführt sind, deren Wärmebrückenwirkung im GEG-Nachweis vernachlässigt werden darf.

5.2 Reduzierung der Wärmebrückenverluste nach DIN 4108 Beiblatt 2

Zwei Kategorien für Wärmebrücken

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) erwartet vom Planer, den Einfluss konstruktiver Wärmebrücken auf den Jahres-Heizwärmebedarf nach den Regeln der Technik und unter Berücksichtigung der im jeweiligen Einzelfall wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Anders als bei flächigen Bauteilen werden jedoch an Wärmebrücken keine energetischen Mindestanforderungen gestellt, es existieren auch keine verbindlichen Höchstwerte für ψ.

Das nicht-normative DIN 4108 Beiblatt 2 [7] gibt in Prinzipskizzen Planungs- und Ausführungsempfehlungen zur Verminderung des Einflusses von Wärmebrücken in energetischer und thermischer Hinsicht. Hierfür werden zwei Kategorien A und B im Sinne von Niveaus definiert, wobei Kategorie A eher der vorherigen Ausgabe des Beiblatts entspricht, während Kategorie B eine weiter verbesserte Wärmebrückenvermeidung darstellt.

Wärmebrückenberücksichtigung mittels pauschalem Zuschlag

Es steht dem Nachweisführenden des GEG-Nachweises frei, die Wärmebrücken einzeln detailliert zu berücksichtigen oder alle zusammen pauschalisiert mittels eines additiven Wärmebrückenzuschlags ΔU_{WB} von 0,03 W/(m²K) für die Kategorie B und 0,05 W/(m²K) für die Kategorie A. Dabei müssen praktisch alle Wärmebrücken des Gebäudes der gewählten Kategorie gleichwertig entsprechen. Dies ist vom Planer im Energieausweis explizit zu bestätigen. Einzelne Wärmebrücken dürfen schlechter als die gewählte Kategorie sein, ihre Referenzwert-Überschreitung ist jedoch zusätzlich in ΔU_{WB} einzurechnen. Für Förderprogramme ist häufig die vorgenommene Einstufung in eine Kategorie für alle Wärmebrücken einzeln zu begründen.

Die Wahlmöglichkeiten sind in Tafel 13 dargestellt. Die derzeit üblichste Variante der Wärmebrückenberücksichtigung ist der pauschale Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} = 0,03 W/(m²K). Unabhängig von der energetischen Einstufung greift natürlich immer auch die hygienische Mindestanforderung der DIN 4108-2 an den Wärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken, nämlich die Einhaltung des Schimmelpilzkriteriums $f_{Rsi} \geq 0{,}70$.

Zu berücksichtigende und vernachlässigbare Wärmebrücken

Welche Wärmebrücken im Rahmen des energetischen Nachweises mindestens zu berücksichtigen sind und welche vernachlässigt werden dürfen, regeln im Grundsatz das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und die DIN/TS 18599-2, die detaillierte Auflistung findet sich jedoch in DIN 4108 Beiblatt 2, Abschnitt 5.5. Mindestens zu berücksichtigen sind:

- Gebäudekanten inklusive Traufe, Ortgang sowie Kanten zwischen erdberührten Bauteilen (Kanten zwischen gleich aufgebauten Bauteilen, typischerweise Außenecken, First etc. können vernachlässigt werden)
- Die Laibungen von Fenstern und Türen (Laibungen vereinzelt auftretender Haus- und Kellertüren dürfen vernachlässigt werden)

Tafel 13 Möglichkeiten für den Nachweis des Wärmebrückenzuschlags ΔU_{WB}

Pauschaler Zuschlag **ΔU_{WB} = 0,15 W/(m²·K)**	Für Bestandsgebäude, bei denen mehr als 50 % der Außenwandfläche mit einer innen iegenden Dämmschicht versehen sind und einbindende Massivdecken vorliegen
Pauschaler Zuschlag **ΔU_{WB} = 0,10 W/(m²·K)**	Standardwert ohne weiteren Nachweis. Er entspricht zahlenmäßig einer Erhöhung der U-Werte aller Hüllflächenbauteile um jeweils 0,10 W/(m²·K). Überbetont üblicherweise den Wärmebrückeneinfluss.
Reduzierter pauschaler Zuschlag **ΔU_{WB} = 0,05 W/(m²·K)**	Wenn alle relevanten Wärmebrücken mindestens der Kategorie A der DIN 4108 Beiblatt 2 entsprechen.
Reduzierter pauschaler Zuschlag **ΔU_{WB} = 0,03 W/(m²·K)**	Wenn alle relevanten Wärmebrücken der Kategorie B der DIN 4108 Beiblatt 2 entsprechen
Kombinierter Zuschlag **(pauschal + individuell)** **ΔU_{WB} = 0,05 W/(m²·K) + $\Delta\psi \cdot \ell_i / \Sigma A$** **bzw.** **$\Delta U_{WB}$ = 0,03 W/(m²·K) + $\Delta\psi \cdot \ell_i / \Sigma A$**	Wenn nicht alle relevanten Wärmebrücken mindestens der Kategorie A bzw. B der DIN 4108 Beiblatt 2 entsprechen. Die Wärmebrücken, die ungünstiger als Kategorie A bzw. B sind, werden mit dem Unterschied (ψ - ψ_{Ref}) zwischen dem tatsächlichen ψ-Wert und dem jeweiligen ψ-Referenzwert der betreffenden Kategorie, multipliziert mit der Wärmebrückenlänge ℓ, in ΔU_{WB} eingerechnet. Relevante Wärmebrücken, die gar nicht im Beiblatt 2 enthalten sind, werden mit $\Psi \cdot \ell$ in ΔU_{WB} eingerechnet.
Pauschaler Zuschlag, **zusätzliche Wärmebrücken** **ohne Beispiel im Beiblatt 2**	Relevante Wärmebrücken, die gar nicht im Beiblatt 2 enthalten sind, werden zusätzlich mit $\psi \cdot \ell$ in ΔU_{WB} eingerechnet.
Individueller ΔU_{WB} bei detaillierter Berücksichtigung der Wärmebrücken	Der individuelle Zuschlag ΔU_{WB} bei detaillierter Wärmebrückenberücksichtigung ist $\Delta U_{WB} = \Sigma(\psi_i \cdot \ell_i) / A$. Hierbei können zusätzlich auch auch punktförmige Wärmebrücken berücksichtigt werden; der Zähler wird dann um + $\Sigma(\chi_j \cdot n_j)$ vergrößert. A ist die gesamte wärmeübertragende Hüllfläche des Gebäudes bzw. der Zone, ℓ_i die Länge der jeweiligen längenbezogenen Wärmebrücke i (und gegebebenfalls n_j die Anzahl, wie oft eine punktförmige Wärmebrücke j auftritt). Zahlenwerte für ψ und χ können selbst berechnet oder der Literatur oder Wärmebrückenkatalogen entnommen werden.

- Decken- und Wandeinbindungen und Deckenauflager, außer sie sind mit mindestens R = 2,5 m²K/W überdämmt
- Balkonplattenanschlüsse (dürfen nur noch wärmetechnisch entkoppelt ausgeführt werden)

Vernachlässigt werden dürfen im GEG-Nachweis u.a.

- Bauteilanschlüsse zwischen zwei gleich aufgebauten Bauteilen, typischerweise z.B. die Außenkanten des Gebäudes und der First
- vereinzelte punktförmige Wärmebrücken wie beispielsweise Durchdringungen der Dämmung durch Holzbalken, Balkon- und Vordachverankerungen (regelmäßige punktförmige Wärmebrücken wie beispielsweise Dübel in WDVS werden nicht bei den Wärmebrücken berücksichtigt, sondern in den U-Wert eingerechnet)

Empfehlungen in DIN 4108 Beiblatt 2

Die Prinzipskizzen im Beiblatt 2 sind als Empfehlungen zur Wärmebrückenvermeidung sowie als Arbeitserleichterung für den bildlichen Gleichwertigkeitsnachweis gedacht und stellen keine Festlegungen im Sinne des Baurechts dar. Auch wenn die Beispiele primär auf den Neubau abzielen, geben die dargestellten Prinzipien auch Hinweise für die Wärmebrückenverminderung bei der Bestandssanierung.

INFO

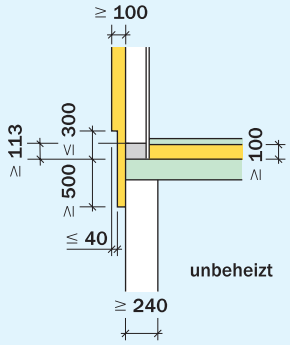
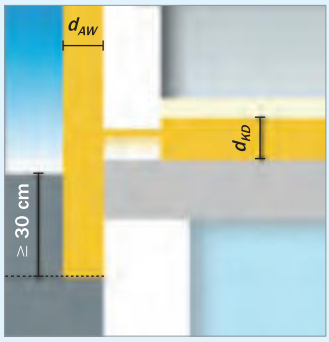
Bei der funktionsgetrennten Kalksandstein-Bauweise können die Bauteilanschlüsse sehr gut die verbesserte Kategorie B erfüllen. Durch den detailliert ermittelten Zuschlag sind bei Kalksandstein-Bauweise weitere Verbesserungen erreichbar. Dies stellt bei energetisch hochwertiger Planung den Standard dar.

5.3 Gleichwertigkeitsnachweis

Der Nachweis, dass eine konkret geplante oder ausgeführte Anschlussausbildung gleichwertig zu den Empfehlungen in DIN 4108 Beiblatt 2 ist, kann auf zwei Arten geführt werden: bildlich oder rechnerisch.

Beim bildlichen Nachweis vergleicht der Planer seine Detailplanung visuell mit den Beispielzeichnungen im Beiblatt und prüft, ob das konstruktive Grundprinzip der Wärmebrückenvermeidung, sowie die Schichtdicken beziehungsweise Wärmedurchlasswiderstände der relevanten Baustoffschichten (Dämmstoffe, Massivbaustoffe) eingehalten sind. Dabei werden gedanklich die

Tafel 14 Beispiel für den rechnerischen Gleichwertigkeitsnachweis für Kategorie B nach DIN 4108 Beiblatt 2

	DIN 4108 Beiblatt 2	Kalksandstein-Wärmebrückenkatalog
Bildlicher Nachweis **Überprüfung:**		
Dämmdicke Außenwand	≥ 100 mm	= 180 mm
Dämmdicke Kellerdecke	≥ 100 mm	= 120 mm
Länge flankierender Dämmung	**≥ 500 mm**	**= 300 mm**
Höhe KS-Wärmedämmstein	≥ 113 mm	= 113 mm
Dicke Kellerwand	≥ 240 mm	= 300 mm
	→ Die Länge der flankierenden Dämmung auf der Kelleraußenwand ist geringer als in der Beispielskizze aus DIN 4108 Beiblatt 2 → Bildlicher Gleichwertigkeitsnachweis ist nicht eingehalten.	
Rechnerischer Nachweis	$\psi_{Ref,Kat.B}$ = 0,15 W/(m·K)	ψ = 0,038 W/(m·K)
	→ Der individuelle ψ-Wert des Bauteilanschlusses ist geringer als der Referenzwert ψ_{Ref} nach DIN 4108 Beiblatt 2 für die Kategorie B → Rechnerischer Gleichwertigkeitsnachweis ist eingehalten. Das Detail entspricht nach DIN 4108 Beiblatt 2 der Kategorie B.	
	→ Im GEG-Nachweis darf ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von 0,03 W/(m²·K) angesetzt werden, sofern alle anderen relevanten Wärmebrücken ebenfalls der Kategorie B entsprechen.	

möglichen Wärmewege von innen nach außen abgegangen und geprüft, ob die Wärme mindestens den gleichen Wärmedurchlasswiderstand überwinden muss wie in der Beispielzeichnung, ohne „Abkürzungen“. Ist dies gegeben, ist der bildliche Gleichwertigkeitsnachweis für den Bauteilanschluss erbracht.

Wenn nicht, oder wenn die Detailplanung grundlegend von der Prinzipskizze im Beiblatt 2 der DIN 4108 abweicht, oder wenn die Wärmebrücke gar nicht im Beiblatt enthalten ist, muss ein rechnerischer Nachweis erfolgen. Dabei kann der ψ-Wert aus Wärmebrückenkatalogen entnommen oder individuell zweidimensional berechnet sein, und darf nicht größer sein als der Referenzwert des Beiblatts für die Anschlusssituation der jeweils gewählten Kategorie A oder B. Hinweis: Die Referenzwerte des Beiblatts sind nicht die ψ-Werte der Beispieldarstellungen, sondern die Höchstwerte bei Variation der Parameter (Bauteildicken, Wärmeleitfähigkeitsspannen) der Beispieldarstellung.

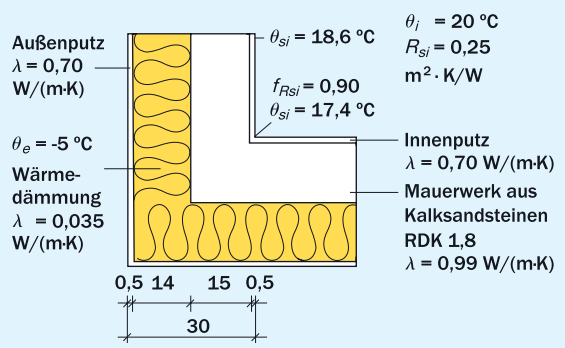
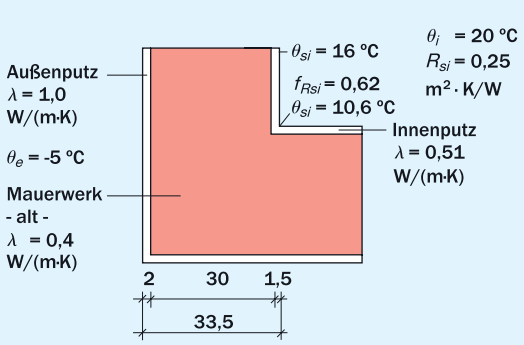
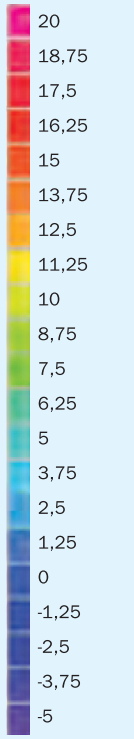
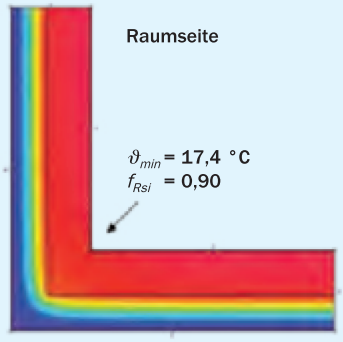
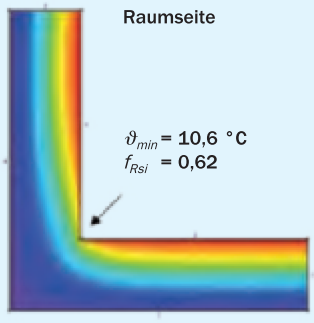
Beide Nachweisvarianten sind gleichberechtigt und können vom Planer frei gewählt werden. Solange für einen Anschluss eines der beiden Nachweisverfahren eingehalten ist, ist die Gleichwertigkeit gegeben. Eine Verpflichtung, dass sowohl der bildliche als auch der rechnerische Nachweis erfüllt sein muss, besteht nicht. Lässt sich weder bildlich noch rechnerisch die Gleichwertigkeit darstellen, kann das Anschlussdetail wärmetechnisch verbessert oder mittels des kombinierten Wärmebrückenzuschlags berücksichtigt werden.

Ein Beispiel für den rechnerischen Gleichwertigkeitsnachweis für Kategorie B der DIN 4108 Beiblatt 2 für den Sockelanschluss an den unbeheizten Keller bei einer Kalksandstein-Funktionswand mit Wärmedämmstein unter Verwendung des Kalksandstein-Wärmebrückenkatalogs zeigt Tafel 14.

5.4 Hygienische Mindestanforderung an Wärmebrücken

Der Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi} ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Wärmebrücken in der Gebäudehülle in hygienischer Hinsicht. Er muss mindestens 0,70 betragen und wird

Tafel 15 **Zweidimensionale Berechnung der Temperaturverteilung in der Raumecke bei KS-Funktionswand (Neubau) und monolithischer Bauweise (Altbau im unsanierten Zustand); Berechnung von f_{Rsi}**

Temperaturverteilung in der Raumecke bei KS-Funktionswand (Neubau)	Temperaturverteilung in der Raumecke bei monolithischer Bauweise (Altbau im unsanierten Zustand)	Temperatur [°C]
		
		
Aufbau von innen nach außen: 0,5 cm Dünnlagenputz (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,70 W/(m·K)) 15 cm KS-Mauerwerk der RDK 1,8 (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,99 W/(m·K)) 14 cm WDVS (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)) 0,5 cm Kunstharzputz (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,70 W/(m·K))	**Aufbau von innen nach außen:** 1,5 cm Gipsputz (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,51 W/(m·K)) 30 cm Bestandsmauerwerk (angenommener Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 0,4 W/(m·K)) 2 cm Kalk-Zementputz (Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit 1,0 W/(m·K))	
Randbedingungen nach DIN 4108-2 (ϑ_i = 20 °C, ϑ_e = -5 °C; R_{si} = 0,25 m²·K/W)		

aus den angesetzten Lufttemperaturen innen und außen und der berechneten Temperatur an der kältesten Stelle der Innenoberfläche bestimmt und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si,min} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \geq 0{,}70 \qquad [-] \qquad (5.1)$$

Die Standard-Randbedingungen nach DIN 4108-2 für den Nachweis sind eine Raumlufttemperatur von 20 °C und 50 % relative Luftfeuchte, eine Außenlufttemperatur von -5 °C, ein Wärmeübergangswiderstand R_{se} von 0,04 m²K/W an der Außenseite und ein Wärmeübergangswiderstand R_{si} von 0,25 m²K/W an der Innenseite. Für diese Bedingungen entspricht f_{Rsi} = 0,70 einer kritischen Oberflächentemperatur von 12,6 °C. Diese Temperatur darf an der ungünstigsten Stelle nicht unterschritten werden. Es müssen immer beide Werte, $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ und $\theta_{si,min} \geq 12{,}6$°C, eingehalten werden, und zwar ohne zu runden.

Der R_{si}-Wert 0,25 m²·K/W anstelle der üblichen raumseitigen R_{si}-Werte bildet den reduzierten Wärmeübergang von der Raumluft auf die Wandoberfläche ab, wie er wegen der behinderten Luftzirkulation in der Nähe der Raumkante oder hinter leichten Gardinen auftritt. Innerhalb der Fläche von Fenstern, Fenstertüren, Türen etc. bleibt R_{si} gemäß DIN EN ISO 13788 bei 0,13 m²·K/W, weil dort von ungehinderter Luftzirkulation ausgegangen werden kann.

Die Raumluft hat überall im Raum die gleiche Wasserdampfkonzentration, nimmt aber unmittelbar an der Wandoberfläche die Temperatur der Wandoberfläche an. Wenn Raumluft von 20 °C und 50 % r.F. dadurch auf 12,6 °C abgekühlt wird, steigt ihre relative Luftfeuchte von 50 % auf 80 % (Bild 8). Eine relative Luftfeuchte von 80 % direkt an der Bauteiloberfläche gilt gerade noch als unkritisch hinsichtlich Schimmelpilzwachstum; bei höheren oberlächennahen Luftfeuchten würde es in den feinen Kapillaren der Baustoffe zu Kondensatbildung kommen, und damit hätte ein Schimmelpilz flüssiges Wasser zum Wachsen zur Verfügung. f_{Rsi} übersetzt diese Grenze in einen dimensionslosen Temperaturfaktor.

Der f_{Rsi}-Wert ermöglicht es, die Situation auf andere Temperaturen und Luftfeuchten umzurechnen. Der Nachweis einer Mindest-Innenoberflächentemperatur von 12,6 °C gilt nur für den rechnerischen Wärmebrückennachweis unter den vorgenannten stationären Annahmen.

INFO

Neben der Einhaltung von f_{Rsi} sind zur Schimmelvermeidung eine gleichmäßige Beheizung, ausreichende Lüftung, und eine unbehinderte Luftzirkulation an den Innenoberflächen der Außenbauteile sicherzustellen.

Die Forderung $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ gilt grundsätzlich für alle linienförmige Wärmebrücken zwischen 2 Bauteilen, sowie für punktförmige Wärmebrücken zwischen 3 flächigen Bauteilen. Sind linienförmige Wärmebrücken konform zu den Kategorien A oder B des DIN 4108 Beiblatt 2, bleiben sie bei sachgemäßer Nutzung des Gebäudes schimmelfrei. Dreidimensionale Ecken stellen punktförmige Wärmebrücken zwischen 3 flächigen Bauteilen dar. Sie gelten ohne weiteren Nachweis als unbedenklich hinsichtlich Schimmelbildung, wenn die 3 linienförmigen Wärmebrücken, die sich in der Ecke treffen, ihrerseits unbedenklich hinsichtlich Schimmelbildung sind und die Dämmschichten im Bereich der Ecke unterbrechungsfrei geführt sind.

An Fenstern und Pfosten-Riegel-Konstruktionen ist Tauwasser in geringen Mengen und kurzzeitig zulässig, sofern die Oberfläche die Feuchtigkeit nicht absorbiert und angrenzende Bereiche nicht durchfeuchtet werden. Daher gilt $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ nicht innerhalb des Fensterelements, wohl aber an der Einbaufuge zwischen Fenster und Baukörper, und natürlich überall sonst in der Fensterlaibung.

INFO

Das Schimmelpilzrisiko an Wärmebrücken ist umso geringer, je besser die flächigen Bauteile wärmegedämmt sind. Dies gilt auch für die Sanierung bestehender Gebäude!

Bei Innendämmungen ist eine gründliche Vorab-Analyse der Feuchtesituation Pflicht und die Konsultation eines Bauphysikers empfohlen.

Schwere Vorhänge, Möblierung und Einbauschränke reduzieren den Wärmeübergang auf die Außenwandoberfläche, wodurch die Innenoberflächentemperatur in diesem Bereich sinkt und die Schimmelpilzgefahr erhöht wird. Der reduzierte Wärmeübergang kann durch einen äquivalenten Wärmeübergangswiderstands $R_{si,äq}$ nach DIN/TS 4108-8 dargestellt werden. $R_{si,äq}$ beinhaltet sowohl den normalen Wärmeübergangswiderstand als auch den zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand des vor der Wand stehenden Schranks. Er kann anstelle des üblichen Wärmeübergangswiderstands R_{si} verwendet werden, um die Oberflächentemperatur hinter dem Hindernis zu berechnen, und die Einhaltung des Schimmelkriteriums $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ in diesem Bereich zu überprüfen:

- hinter freistehenden Schränken: $R_{si,äq}$ = 0,5 m²·K/W
- hinter Einbauschränken: $R_{si,äq}$ = 1 m²·K/W

Der Oberflächentemperaturfaktor f_{Rsi} ist primär für den rechnerischen Nachweis mittels 2- oder 3-dimensionaler Wärmebrückenberechnung unter stationären Randbedingungen konzipiert. Die Messung von f_{Rsi} bzw. $\theta_{si,min}$ im realen Gebäude ist problematisch, da die tatsächlichen Bedingungen zeitlich variieren und somit zu Ergebnissen führen können, die signifikant vom rechnerischen Ergebnis abweichen. Dies kann aufgrund von Faktoren wie dem Tagesgang des Wetters, Solarstrahlung, Beheizung, Nutzung, und dem 'thermischen Gedächtnis' des Gebäudes geschehen. Daher sind die Messergebnisse nicht aussagekräftig und können je nach zufälligem Messzeitpunkt in beide Richtungen abweichen. Deshalb ist es nicht möglich, die Einhaltung mittels Infrarotkamera nachzuweisen. Stattdessen ist eine Langzeitmessung über mindestens zwei Wochen erforderlich, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Weitere Hinweise hierzu finden sich in DIN/TS 4108-8.

5.5 Rollladenkästen

Einbau- und Aufsatz-Rollladenkästen weisen einen örtlich erhöhten Wärmeverlust gegenüber einer Bauweise ohne Rollladenkasten auf. Dies gilt auch für Vorsatzkästen, wenn ein breiteres

oberes Fensterprofil oder eine Rahmenverbreiterung eingesetzt wird, sowie für Mini-Aufsatzkästen. Im wärmeschutztechnischen Nachweis werden Rollladenkästen in der Regel übermessen und ihre Fläche, je nach Kastenart, der Wandfläche (Einbaukasten, Sturzkasten, Aufsatzkasten) oder der Fensterfläche (Mini-Aufsatzkasten, Vorsatzkasten, teilweise auch Aufsatzkasten) zugeschlagen. Eine Rahmenverbreiterung bei Vorsatzkästen sowie der Einfluss von Mini-Aufsatzkästen und Aufsatzkästen, die der Fensterfläche zugeschlagen werden, ist in einem modifizierten U-Wert für die Wandöffnung des Fensterelements zu berücksichtigen.

Für den wärmeschutztechnischen Nachweis ist es erforderlich, dass an jeder Stelle des Kastens, beim Anschluss an den Blendrahmen sowie beim Sturzanschluss, der Oberflächentemperaturfaktor $f_{Rsi} \geq 0{,}70$ eingehalten wird. Zusätzlich ist in der Referenz-Einbausituation gemäß DIN 4108-2 Beiblatt 2 der Referenz-ψ-Wert für die Kategorie A oder B einzuhalten, wenn im GEG-Nachweis ein pauschaler ΔU_{WB} angesetzt wird.

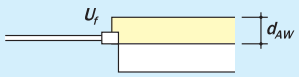
Wärmetechnisch günstige Rollladenkästen sind durch eine möglichst dicke und effektive Wärmedämmung zwischen Rollraum und Decke/Sturz, am Innenschenkel und über dem Blendrahmen des Fensters gekennzeichnet. Die Dämmung sollte den Blendrahmen möglichst weit überdecken. Die Einbausituation von Rollladenkästen im Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) ist in der Regel günstiger zu bewerten als die Einbausituation im monolithischen Mauerwerk. Hier ist aufgrund der Dämmdicke des WDVS eine außenseitige Überdämmung des Kastens gewährleistet, und der Rollraum kann soweit nach außen rutschen, dass die Dämmung der Innenschürze recht dick ausfallen kann. Die Wärmebrückenwirkung der einbindenden Decke wird durch das WDVS stark vermindert. Es ist wichtig, auf eine ausreichende Dämmdicke des Kastens nach oben zur Betondecke zu achten, um die Wärmeverluste an dieser Stelle zu minimieren.

Bei Rollladenkästen in zweischaligem Mauerwerk wird die Dämmschicht in der Regel nicht über die Außenseite des Kastens geführt. Hier ist die Dämmdicke am Innenschenkel aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse geringer. In diesem Fall kann die Verwendung eines Vorsatzkastens, der als Linksroller eingebaut wird, wärmetechnisch günstiger sein. Der Vorsatzkasten tritt als gestalterisches Element in der Fassade auf.

5.6 Einbaulage von Fenstern

Die Einhaltung des Prinzips der durchgehenden Dämmebene ist wichtig für eine wärmetechnisch günstige Fenstermontage. Bei KS-Funktionswänden mit Wärmedämmverbundsystem und zweischaligen KS-Außenwänden mit Wärmedämmung ist es wärmetechnisch vorteilhaft, das Fenster außen vor der tragenden Wand, d.h. in der Dämmebene, zu montieren. Hierbei ist es ausreichend, wenn die Innenseite des Fensters flächenbündig mit der Außenseite der tragenden Wand abschließt. Die Befestigung am tragenden Mauerwerk erfolgt mittels Laschen und/oder Winkel. Der Blendrahmen wird außenseitig überdämmt. An der KS-Tragschale kann die Befestigung der Winkel oder Konsolanker einfach und sicher erfolgen. Hierfür gibt es auch justierbare Lösungen, bei denen das Ausrichten der Fenster in allen Raumrichtungen erfolgen kann. Die Einbauebene ist frei wählbar, und Auskragungen bis 150 mm sind möglich. Die nachfolgenden Dichtungsmaßnahmen zwischen Blendrahmen und Mauerwerk werden durch die Montageschienen nicht behindert (Bild 12).

Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ [W/(m·K)]



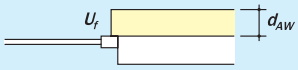
		Rahmendicke d_f			
		≤ 70 mm	80 mm	90 mm	≥ 120 mm
		entspricht typischem U_f-Wert [W/(m²·K)]			
		1,4 oder größer	1,3–1,2	1,1–1,0	0,9 oder kleiner
Dicke der Außenwanddämmung d_{AW} [cm]	10	0,000	0,000	0,001	–
	14	0,002	0,001	0,001	0,000
	18	0,004	0,004	0,003	0,001
	24	0,008	0,008	0,007	0,004
	30	0,012	0,011	0,010	0,008

Hinweise

- Die Fensteröffnung ist mindestens 30 mm zu überdämmen (Überdämmung der Montagefuge 1 cm, Überdämmung des Blendrahmens 2 cm).
- Der ψ-Wert hängt in erster Linie von der Rahmendicke d_f ab. Ist diese bekannt, wird ψ ohne Berücksichtigung von U_f oder U_w für diese Rahmendicke abgelesen. Ist die Rahmendicke nicht bekannt, wird ersatzweise vom U_f-Wert des Rahmens ausgegangen. Ist dieser ebenfalls unbekannt, kann er mit der Faustformel $U_f \approx U_w + 0{,}4$ W/(m²·K) aus dem U_w-Wert des Fensters abgeschätzt werden. Alternativ kann U_f mit der genauen Formel nach DIN EN ISO 10077-1 berechnet werden.
- Gilt für alle Dicken und alle Rohdichteklassen des KS-Mauerwerks

Bild 12 **Fenstermontage in der Dämmebene – anzusetzende lineare Wäremdurchgangskoeffizienten für unterschiedliche Dämmdicken (aus dem KS-Wärmebrückenkatalog) [8]**

Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ [W/(m·K)]



		Rahmendicke d_f			
		≤ 70 mm	80 mm	90 mm	≥ 120 mm
		entspricht typischem U_f-Wert [W/(m²·K)]			
		1,4 oder größer	1,3–1,2	1,1–1,0	0,9 oder kleiner
Dicke der Außenwand-dämmung d_{AW} [cm]	10	0,023	0,029	0,033	0,044
	14	0,028	0,033	0,038	0,049
	18	0,032	0,038	0,042	0,054
	24	0,036	0,042	0,047	0,059
	30	0,040	0,046	0,051	0,063

Hinweise

- Die Fensteröffnung ist mindestens 30 mm zu überdämmen (Überdämmung der Montagefuge 1 cm, Überdämmung des Blendrahmens 2 cm).
- Der ψ-Wert hängt in erster Linie von der Rahmendicke d_f ab. Ist diese bekannt, wird ψ ohne Berücksichtigung von U_f oder U_w für diese Rahmendicke abgelesen. Ist die Rahmendicke nicht bekannt, wird ersatzweise vom U_f-Wert des Rahmens ausgegangen. Ist dieser ebenfalls unbekannt, kann er mit der Faustformel $U_f \approx U_w + 0{,}4$ W/(m²·K) aus dem U_w-Wert des Fensters abgeschätzt werden. Alternativ kann U_f mit der genauen Formel nach DIN EN ISO 10077-1 berechnet werden.
- Gilt für alle Dicken und alle Rohdichteklassen des KS-Mauerwerks

Bild 13 **Montage des Fenster in der Mauerwerksebene – z.B: Außenseite des Fensters flächenbündig mit der Außenseite der tragenden Wand – bei funktionsgetrennter Bauweise und Überdämmung des Blendrahmens (aus dem KS-Wärmebrückenkatalog) [8]**

Eine alternative Montagemethode ist die Installation des Fensters innerhalb der Rohbauöffnung. Diese Methode ermöglicht eine Befestigung in der Rohbauöffnung mittels handelsüblicher Rahmendübel. Es ist zu beachten, dass der Blendrahmen außenseitig mindestens 2 cm dick überdämmt werden sollte (Bild 13).

Die Montage des Fensters in der Dämmebene ist wärmetechnisch die etwas vorteilhaftere Lösung, da sie die Wärmebrücke in der Fensterlaibung reduziert.

6. Wärmebrücken in KS-Mauerwerk

6.1 Verringerung der Wärmebrückenwirkung durch KS-Wärmedämmsteine

Der Kalksandstein-Wärmebrückenkatalog [8] enthält etwa 150 Detaillösungen mit zahlreichen Varianten zur Verminderung von Wärmebrücken in KS-Mauerwerk. Die Online-Planungshilfe ist unter www.ks-waermebruecken.de abrufbar und ermöglicht auch eine detaillierte Berechnung des Wärmebrückenzuschlags ΔU_{WB}.

Der Unterschied in der Wärmebrückenwirkung mit und ohne Verwendung eines KS-Wärmedämmsteins als erste Steinlage auf der unbeheizten Kellerdecke wird beispielhaft für den Kellerdeckenanschluss dargestellt (Bild 14).

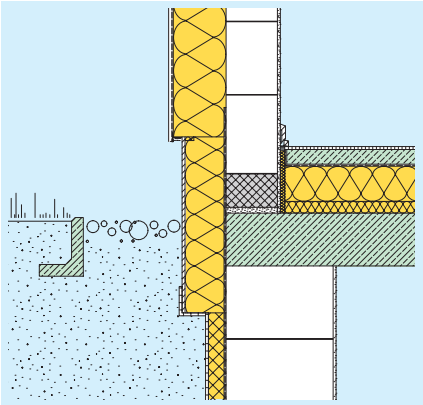
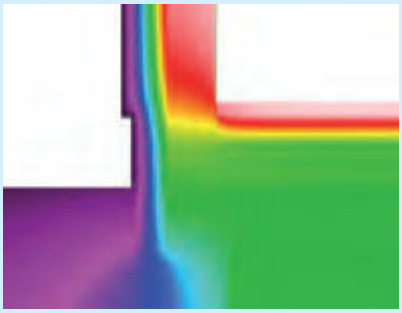


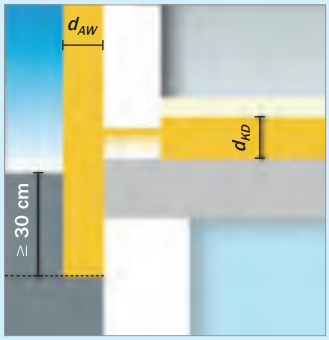
Bild 14 **Konstruktionszeichnung aus KS-Detailsammlung, Detail 2.2.3**



Rote Farben entsprechen hohen Temperaturen, blaue und violette niedrigen.

Bild 15 **Temperaturverlauf am Anschlussdetail von Bild 14**

Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ [W/(m·K)]



		Dicke der Kellerdeckendämmung d_{KD} [cm]			
		8	12	16	24
Dicke der Außenwand-dämmung d_{AW} [cm] (Sockel-dämmung 0 bis 4 cm dünner)	10	0,098	0,090	0,084	0,071
	14	0,056	0,060	0,063	0,063
	18	0,026	0,038	0,047	0,056
	24	-0,010	0,011	0,026	0,044
	30	-0,042	-0,013	0,007	0,032

Hinweise

- Die deckenstirnseitige Sockeldämmung ist in einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0{,}035$ W/(m·K) auszuführen, bis höchstens 30 cm über Geländeoberkante.
- Ein eventueller Rücksprung der Sockeldämmung gegenüber dem WDVS beträgt höchstens 4 cm.
- Die Sockeldämmung ist bis mindestens 30 cm unter Geländeoberkante herabzuführen.
- Die Dicke d_{BP} der Bodenplattendämmung bezieht sich auf die Summe der Dicken der Wärme- und der Trittschalldämmung.
- Der ψ-Wert darf in der EnEV-Berechung nicht mit dem F_x-Wert für den unteren Gebäudeabschluss beaufschlagt werden.
- Gilt für Dicken ≤ 17,5 cm und für Rohdichteklassen ≤ 2,0 des KS-Mauerwerks oberhalb des Kellers und für alle Dicken und alle Rohdichten des KS-Mauerwerks im Keller.

Bild 16 **Sockeldetail (WDVS) – KS-Wärmebrückenkatalog, Detail 2.2.3**

Durch den Einsatz des KS-Wärmedämmsteins, der gleichzeitig die für Kalksandstein übliche hohe Druckfestigkeit aufweist, kann das Prinzip der umlaufenden Dämmebene am Kellerdeckenanschluss auch bei mehrgeschossigen Gebäuden annähernd eingehalten werden. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung der Wärmeverluste an der Wärmebrücke: Ohne KS-Wärmedämmstein entspricht der Anschluss der Kategorie A aus DIN 4108 Beiblatt 2, mit KS-Wärmedämmstein der Kategorie B. Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ wird von 0,066 W/(m·K) ohne KS-Wärmedämmstein auf 0,038 W/(m·K) mit KS-Wärmedämmstein reduziert, was einer Verbesserung um etwa 40 % entspricht.

Als Beispiele zeigt Bild 15 den Temperaturverlauf an der Anschlussstelle; Bild 16 die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für den Kellerdeckenanschluss mit KS-Wärmedämmstein.

6.2 Einfluss von mechanischen Befestigungsmitteln

6.2.1 Mauerwerksanker

Mechanische Befestigungselemente wie Anker und Konsolen erfordern gegebenenfalls eine Korrektur des U-Werts um ihren Einfluss. Dies ist umso wichtiger, je besser die Konstruktion gedämmt ist, da sich die punktförmigen Wärmebrücken dann stärker bemerkbar machen (Bild 17).

Keine Korrektur ist erforderlich für

- Mauerwerksanker, die eine Luftschicht überbrücken,
- Mauerwerksanker, die zwischen Mauerwerkschale und Holzständer angeordnet sind,
- Befestiger, deren Wärmeleitfähigkeit komplett, oder eines Teils des Befestigers, kleiner als 1 W/(m·K) ist.

Tafel 16 **Ankerdichte, die ohne U-Wert-Korrektur für den Ankereinfluss möglich ist, für verschiedene U-Werte der ungestörten Wand. Bei einer höheren Ankerdichte oder bei Ankern mit höherem λ-Wert ist der Einfluss der Anker im U-Wert zu berücksichtigen**

U-Wert der Wand (ungestörter Bereich) [W/(m²·K)]	Wärmebrückeneinfluss durch die Luftschichtanker ohne U-Wert-Korrektur bis zu (max. 3 % des U-Werts der ungestörten Wand) [W/(m²·K)]	Ankerdichte[1)] ohne U-Wert-Korrektur bis zu [Stück/m²]
≥ 0,125	0,0038	5
≥ 0,150	0,0045	6
≥ 0,175	0,0053	7
≥ 0,200	0,0060	8
≥ 0,225	0,0068	9

[1)] Anzahl an Luftschichtankern pro m² bei zweischaligem Mauerwerk (Edelstahlanker, d = 4 mm mit χ-Wert 0,00075 W/K).

Bei großen Dämmdicken und großem Schalenabstand steigt die Ankeranzahl pro m² und damit der Wärmeverlust durch die Summe der Anker an. Tafel 16 zeigt an einem Beispiel auf, bis zu welcher Anzahl der dort dargestellten Luftschichtanker pro m² Wandfläche keine Korrektur des U-Werts erforderlich wird.

6.2.2 Konsolen und Anker bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF)

Bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF) wird die Dämmschicht regelmäßig von den Befestigungsteilen durchstoßen, wodurch nennenswerte Wärmebrückeneffekte entstehen können. Bereits wenige Anker pro m² können eine Erhöhung des U-Werts um 0,1 bis 0,2 W/(m²·K) oder mehr zur Folge haben. Es wird empfohlen, thermisch getrennte Befestigungsteile einzusetzen oder zugelassene thermische Trennlagen zwischen Konsole und Wand anzubringen. Die Wärmebrücken sind in den U-Wert der Wandfläche mit VHF einzurechnen.

Die Richtlinie „Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden“ [9] stellt entsprechende Werte für typische Verankerungssysteme zur Verfügung und bietet Bemessungsdiagramme zur Berücksichtigung verschiedener Verankerungssysteme.

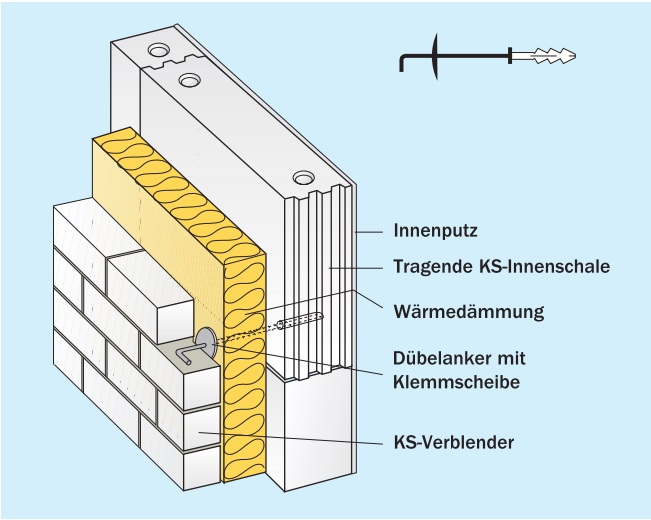


Bild 17 Systemaufbau für zweischaliges Mauerwerk mit Wärmedämmung

Tafel 17 Vergleich von Konstruktionen mit punktförmigen Wärmebrücken: Einfluss auf den U-Wert

Konstruktion	Dämmstoffdicke (λ = 0,032 W/(m·K)) [cm]	U-Wert[1] ohne Wärmebrücken [W/(m²·K)]	Ankeranzahl n [1/m²]	χ-Wert eines Ankers/Dübels [W/K]	Wärmebrückeneinfluss ΔU (= $n \cdot \chi$) [W/K]	[%]	U-Wert[1] mit Wärmebrücken [W/(m²·K)]
a) Zweischaliges Mauerwerk mit Edelstahl-Dübelankern, d = 4 mm (außenseitig 11,5 cm KS-Verblender mit λ = 1,1 W/(m·K))	20	0,15 (0,149)	9	0,00075	0,007	4,7	0,16 (0,156)
b) Geklebtes Wärmedämm-Verbundsystem oder geklebt und gedübelt mit Dübeln der Dübelklasse 0 (Null) (außenseitig 0,5 cm Außenputz mit λ = 0,70 W/(m·K))	20	0,15 (0,151)	0	–	–	–	0,15 (0,151)
c) Gedübeltes Wärmedämm-Verbundsystem mit Kunststoffdübeln χ = 0,002 W/K (außenseitig 0,5 cm Außenputz mit λ = 0,70 W/(m·K))	20	0,15 (0,151)	4,5	0,002	0,009	6,0	0,16 (0,160)
d) Vorgehängte hinterlüftete Fassade – verzinkter Stahl (außenseitig 2 cm Hinterlüftung und 4 cm Naturstein mit λ = 3,5 W/(m·K))	20	0,15 (0,150)	1,78	0,018	0,032	21	0,18 (0,182)
e) Vorgehängte hinterlüftete Fassade – Aluminium (außenseitig 2 cm Hinterlüftung und 4 cm Naturstein mit λ = 3,5 W/(m·K))	20	0,15 (0,150)	1,78	0,040	0,071	47	0,22 (0,221)
Wandaufbau: 1 cm Innenputz mit λ = 0,51 W/(m·K); 17,5 cm KS-Tragschale RDK 2,0 mit λ = 1,1 W/(m·K); 20 cm Wärmedämmung mit λ = 0,032 W/(m·K); außenseitig KS-Verblender bzw. Putz bzw. hinterlüftete Natursteinfassade							

[1] U-Werte werden als Endergebnis auf zwei wertanzeigende Stellen gerundet. Als Zwischenergebnis (z.B. für die Berechnung von ψ-Werten) erfolgt zusätzlich die Angabe der U-Werte mit drei wertanzeigenden Stellen in Klammern.

Der Einfluss der Befestigungsmittel wird bei einem Vergleich der Wärmebrückenwirkung verschiedener Befestigungsarten bei Kalksandstein-Konstruktionen deutlich (Tafel 17):

- a) Zweischaliges Mauerwerk mit Kalksandstein-Verblendmauerwerk ohne Hinterlüftung
- b) KS-Mauerwerk mit geklebtem Wärmedämm-Verbundsystem, oder mit geklebtem und gedübeltem Wärmedämm-Verbundsystem mit Dübeln der Dübelklasse 0 (Null)
- c) KS-Mauerwerk mit geklebtem, oder mit geklebtem und gedübeltem Wärmedämm-Verbundsystem, mit handelsüblichen Kunststoffdübeln mit einem Einstufungswert für χ von 0,002 W/K (Dübelklasse 0,002) und durchschnittlich 4,5 Dübeln pro Quadratmeter.
- d) vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) mit einer handelsüblichen Tragkonstruktion aus verzinktem Stahl im Rastermaß 0,75 m x 0,75 m, und 6 mm dicker thermischer Trennung zwischen Tragschale und Konsolen.
- e) identisch zu d), aber mit Aluminium-Tragkonstruktion

Ein ausschließlich geklebtes Wärmedämm-Verbundsystem weist keine punktförmigen Wärmebrücken auf. Ein geklebtes und gedübeltes Wärmedämm-Verbundsystem mit Dübeln der Dübelklasse 0 (Null) gilt ebenfalls als wärmebrückenfrei. Bei Systemen mit Befestigungsmitteln können bereits kleine χ-Werte $\geq$ 0,0005 W/K auch bei niedrigen Anker- bzw. Dübeldichten zu einem erkennbaren Anstieg des Wärmetransports führen. Insbesondere bei VHF muss der Einfluss der Befestigungsmittel im U-Wert berücksichtigt werden, um den zutreffenden Wärmebedarf des Gebäudes zu erhalten.

7. Klimabedingter Feuchteschutz

Die Erzielung behaglicher, trockener Räume ist von entscheidender Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Nutzer. Feuchte Wände und Decken können zu Schimmelpilzwachstum führen, was nicht nur ästhetisch unerwünscht ist, sondern auch aufgrund der möglichen toxischen Wirkungen und Allergien zu vermeiden ist. In Räumen mit feuchten Bauteilen ist ein behagliches Raumklima kaum erreichbar. Deshalb ist der Schutz der Außenbauteile gegen Feuchtigkeit eine wichtige bauphysikalische Aufgabe. Um eine ausreichende Feuchtigkeitssicherung zu gewährleisten, gilt:

- Baukonstruktionen müssen über einen konstruktiven Schutz vor Regen oder Schlagregen und vor aufsteigender Feuchte verfügen.
- Der Schutz gegen Oberflächenkondensat auf der Raumseite erfolgt durch einen ausreichenden Wärmeschutz in der Fläche und im Bereich von Wärmebrücken.
- Darüber hinaus muss der Schutz gegen unzulässige Tauwasserbildung infolge von Wasserdampf im Inneren des Bauteils konstruktiv sichergestellt werden, beispielsweise durch eine angepasste Schichtenfolge oder durch raumseitig diffusionshemmende Schichten.
- Eine luftdichte Ausführung der Bauteile und Anschlusspunkte ist ebenfalls erforderlich, um eine Durchströmung der Konstruktion mit warmer, feuchter Raumluft und Kondensatbildung im Bauteilinneren zu vermeiden.
- Bei Neubauten muss eventuell vorhandene Baufeuchte in der Anfangsphase durch erhöhtes Heizen und Lüften abgeführt werden, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden. Üblicherweise rechnet man mit einer Zeitdauer von etwa zwei Jahren, bis die Baufeuchte aus massiven Bauteilen ausgetrocknet ist.

INFO

Zweischaliges KS-Mauerwerk mit Wärmedämmung, oder mit Wärmedämmung und Luftschicht, sowie einschaliges KS-Mauerwerk mit Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) oder hinterlüfteter Außenwandbekleidung sind ohne weiteren Nachweis für alle Schlagregenbeanspruchungsgruppen der DIN 4108-3 geeignet.

7.1 Diffusion von Wasserdampf

Wasserdampfdiffusion ist der Transport gasförmigen Wassers in den Poren und Kapillaren des Baustoffs, angetrieben durch unterschiedliche Wasserdampfteildrücke bzw. unterschiedliche Luftfeuchtekonzentration zu beiden Seiten der Bauteile aufgrund verschiedener klimatischer Bedingungen innen und außen. Die Diffusion erfolgt in der Regel vom beheizten Bereich nach außen. Obwohl die Massenströme gering sind, kann es bei ungünstiger Schichtenfolge, oder wenn auf der Warmseite der Dämmebene diffusionshemmende Schichten fehlen, zu einer unzulässigen Tauwasserbildung im Inneren der Konstruktion über die Winterperiode kommen.

Der Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen Tauwasserbildung im Bauteilinneren erfolgt nach dem Blockklima-Verfahren („Glaser“-Verfahren) der DIN 4108-3 mit jeweils 3-monatiger Tau- und Verdunstungsperiode unter konstanten Klimaannahmen. Dieses einfache, „auf der sicheren Seite“ liegende Bewertungsverfahren hat sich insbesondere bei Bauteilen und Baustoffen ohne besondere Sorptions- und Kapillareffekte bewährt.

Die europäische Norm DIN EN 13788 bietet ein analoges, monatsweise bilanzierendes Verfahren an. Da hierfür jedoch keine

für Deutschland geltenden Klimarandbedingungen festgelegt sind, kann es derzeit nicht für den baurechtlichen Feuchteschutznachweis verwendet werden.

In den letzten Jahren haben sich realitätsnahe, instationäre Simulationsprogramme etabliert, die den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport durch Bauteile unter Berücksichtigung der Kapillarwirkung instationär abbilden. Damit lassen sich auch Konstruktionen wie Innendämmungen mit kapillaraktiven Systemen untersuchen, die mit dem Glaser-Verfahren nicht abgebildet werden können. Solche Konstruktionen sind spezifisch für Standort und Gebäudeausrichtung zu bewerten.

7.2 Kennwerte für die Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion wird anhand folgender Kennwerte berechnet:

- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ: Diese dimensionslose Kennzahl charakterisiert den Widerstand, den ein Baustoff der Diffusion von Wasserdampf relativ zum Diffusionswiderstand ruhender Luft entgegensetzt. μ ist bei definierten Bedingungen eine Stoffkonstante. Richtwerte finden sich in DIN 4108-4 und DIN EN ISO 10456. Sind zwei μ-Werte angegeben, ist der für die Tauperiode ungünstigere Wert zu verwenden, d.h. der Wert, bei dem sich die höhere Tauwassermenge ergibt. Dieser μ-Wert ist dann auch für die Verdunstungsperiode beizubehalten (Bild 18).

- Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d: Sie drückt aus, wie dick eine ruhende Luftschicht sein müsste, um den gleichen Widerstand gegen Wasserdampfdurchgang wie die betrachtete Bauteilschicht aufzuweisen. Der s_d-Wert ist das Produkt aus der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ des Materials und der Dicke d der betrachteten Schicht. Er ist keine Materialeigenschaft, sondern eine Schichteigenschaft.

Je nach s_d-Wert wird die Diffusionshemmung einer Baustoffschicht oder Bauprodukts wie folgt eingestuft:

- Diffusionsoffene Schicht: $s_d \leq 0{,}5$ m (für Messwerte $s_d < 0{,}10$ m wird $s_d = 0{,}10$ m angesetzt, um mögliche Messunsicherheiten bei kleinen s_d-Werten aufzufangen)

- Diffusionsbremsende Schicht: $0{,}5 \text{ m} < s_d \leq 10$ m

- Diffusionshemmende Schicht: $10 \text{ m} < s_d \leq 100$ m

- Diffusionssperrende Schicht: $100 \text{ m} < s_d < 1.500$ m

- Diffusionsdichte Schicht: $s_d \geq 1.500$ m

- Schicht mit variablem s_d-Wert: Bauteilschicht, die ihren s_d-Wert in Abhängigkeit von der umgebenden relativen Luftfeuchte verändert

Die umgangssprachlichen Bezeichnungen „Dampfbremse“ und „Dampfsperre“ sind nicht normkonform und nicht eindeutig definiert, weshalb sie vermieden werden sollten. Für mehrschichtige Bauteile werden die s_d-Werte der einzelnen Schichten addiert, um den s_d-Wert des gesamten Bauteils zu erhalten. Die Wasserdampf-Übergangswiderstände an den Bauteiloberflächen sind so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke einer Wärmedämmschicht liegt in der Größenordnung einer massiven Holzwand (Bild 19).

7.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist

In DIN 4108-3 sind zahlreiche Aufbauten von zahlreichen Wand- und Dachbauteilen beschrieben, die keines weiteren Diffusionsnachweises bedürfen. Ihre feuchtetechnische Funktionsfähigkeit ist aus Erfahrung bekannt oder mittels Simulati-

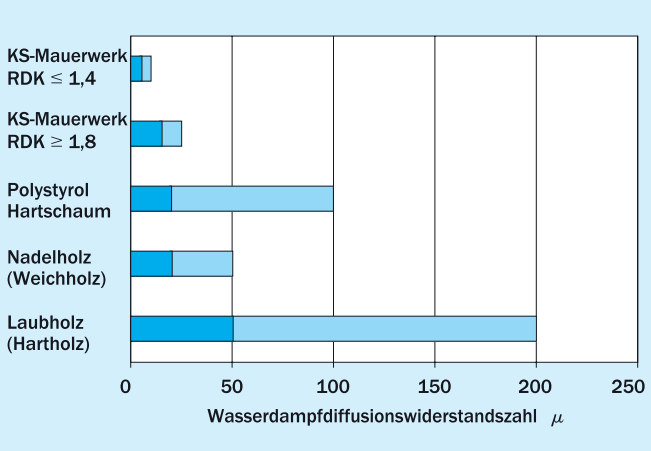


Bild 18 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen ausgewählter Materialien, angegeben sind jeweils Kleinst- und Größtwert nach DIN 4108-4 bzw. nach DIN EN 12524

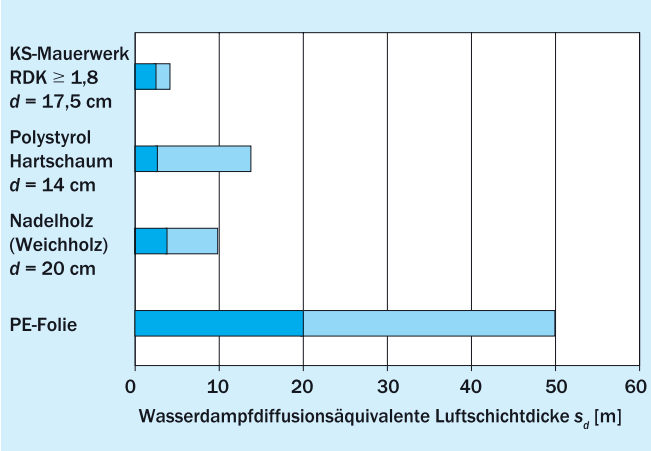


Bild 19 Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d ausgewählter Baustoffe, jeweils für den Kleinst- und den Größtwert des μ-Werts nach DIN 4108-4 bzw. nach DIN EN 12524

onsverfahren nachgewiesen; das Blockklima-Verfahren ist für diese Bauteile nicht anzuwenden. Diese Liste der nachweisfreien Bauteile findet sich in Abschnitt 5.3 der Norm und erstreckt sich über 16 Seiten. Eine Auswahl daraus umfasst:

Außenwände und Bodenplatten (Auswahl):

- Außenwände aus einschaligem Mauerwerk, verputzt
- Außenwände aus mehrschaligem Mauerwerk mit Wärmedämmung, mit Wärmedämmung und Luftschicht oder nur mit Luftschicht
- Außenwände mit hinterlüfteter Außenwandbekleidung oder Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS)
- Außenwände mit angemörtelten Bekleidungen mit mindestens 5 % Fugenanteil
- Perimetergedämmte Kelleraußenwände aus Beton oder Mauerwerk
- Wände in Holzbauart mit Mauerwerk-Vorsatzschale und raumseitiger Schicht mit $s_d \geq 2$ m
- Perimetergedämmte Bodenplatten mit Abdichtung nach DIN-Normen, wenn die Schichten raumseitig der Abdichtung ≤ 20 % des Wärmedurchlasswiderstands ausmachen
- Bodenplatten mit raumseitiger Dämmung und Zementestrich, wobei $s_{d,i} \geq 20$ m sein sollte
- Wände mit Innendämmung ohne Schlagregenbelastung unter bestimmten Randbedingungen

Dächer (Auswahl):

- nicht belüftete Dächer mit belüfteter Dachdeckung und Dämmung zwischen, unter und/oder über Sparren, wenn $s_{d,i}$ und $s_{d,e}$ in einem bestimmtem Verhältnis zueinander stehen
- bestimmte nicht belüftete Steil- und Flachdächer mit Zwischensparren- und Aufsparrendämmung unter gewissen Bedingungen u.a. für Materialien, Schichtdicken und Dampfbremsen
- bestimmte oberste Geschossdecken

INFO

Bei nicht belüfteten Dächern mit belüfteter oder unbelüfteter Dachdeckung und äußeren diffusionshemmenden Schichten mit $s_{d,e} \geq 2$ m ist zu beachten, dass Holz oder Holzwerkstoffe nur bis zur zulässigen Materialfeuchte zwischen inneren und äußeren diffusionshemmenden Schichten eingebaut werden, und dass erhöhte Baufeuchte oder später z. B. durch Undichtheiten eingedrungene Feuchte nur schlecht oder gar nicht wieder austrocknet.

7.4 Konstruktive Hinweise

Generell sollte der s_d-Wert von innen nach außen abnehmen, um die Diffusion nicht zu behindern. Zugelassene oder genormte Wärmedämm-Verbundsysteme weichen davon ab, ihre Systemkomponenten sind aber aufeinander abgestimmt, sodass die Diffusion nur geringfügig behindert wird. Ihre Funktionsfähigkeit ist aus langjähriger Erfahrung bekannt.

INFO

Zweischalige Kalksandstein-Außenwände mit Dämmung, mit WDVS und Kellerwände mit Perimeterdämmung sind hinsichtlich Wasserdampfdiffusion unkritisch und bedürfen keines Diffusionsnachweises nach DIN 4108-3.

Bei Innendämmungen besteht ein hohes Kondensat-Risiko an der Innenseite der tragenden Wand. Abhilfe schaffen diffusionshemmende Dämmstoffe, raumseitige Bekleidungen oder kapillarleitende Dämmstoffe. Aus Gründen der Diffusion, aber auch der Wärmebrückenvermeidung ist eine außenseitige Dämmung oder Kerndämmung einer Innendämmung vorzuziehen. Dadurch wird nur die tragende Konstruktion vor Temperaturwechselbeanspruchungen geschützt, und Wärmebrücken durch innenseitig einbindende Bauteile vermieden.

7.5 Austrocknungsverhalten von Mauerwerkswänden

Das Austrocknungsverhalten von Baustoffschichten und Bauteilen ist insbesondere dann wichtig, wenn diese für die Wärmedämmung von Bedeutung sind. Bei monolithischem Mauerwerk hängt der Wärmeschutz der Außenwand überwiegend von den Mauersteinen ab. Wird ein solches Mauerwerk in der Bauphase durchnässt oder durchfeuchtet, wird der geplante Wärmeschutz erst erreicht, wenn die Wände bis zur Ausgleichsfeuchte ausgetrocknet sind. Rechnerische Untersuchungen zeigen, dass dies bis zu zwei bis drei Jahre dauern kann, wobei der Heizwärmebedarf in dieser Zeit um bis zu 30 % höher sein kann als im ausgetrockneten Zustand.

Bei Kalksandstein-Außenwandkonstruktionen wird der wesentliche Teil der Wärmedämmung von den zusätzlichen Wärmedämmschichten auf der Außenseite der Tragschale erbracht. Die dafür empfohlenen Dämmstoffe (z.B. EPS-Hartschaum oder hydrophobierte Mineralwolleplatten) nehmen praktisch kein Wasser auf, sodass der Wärmeschutz von Kalksandstein-Funktionswänden von Anfang an gewährleistet ist.

INFO

Der Wärmeschutz von Kalksandstein-Funktionswänden ist von Anfang an gewährleistet.

Untersuchungen von Künzel [10] zeigen:

Die Austrocknungszeit von Wandkonstruktionen mit Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) bei Kalksandsteinen liegt im Bereich der von monolithischen Wänden, bei Verwendung von Mineralwolle sogar darunter. Da das KS-Mauerwerk selbst nur wenig zur Wärmedämmung beiträgt, stellt eine eventuell lang anhaltende Baufeuchte [10] in der Regel kein Problem dar, solange sie nicht in feuchteempfindliche Bereiche eindringt.

Bei wärmedämmenden und monolithischen Wandbildnern sind WDVS mit wasserdampfdiffusionshemmender Wirkung (z.B. EPS-Hartschaum) ungünstig, da die geringe Trocknungsmöglichkeit nach außen zu länger erhöhter Baufeuchte und reduziertem Wärmedurchlasswiderstand führen kann. Ein WDVS auf Mineralwollebasis führt zu Austrocknungszeiten wie bei Wänden ohne Außendämmung.

INFO

Generell ist in der Austrocknungsphase zu beachten, dass ein erheblicher Teil der Baufeuchte nicht an die Außenluft, sondern an den Innenraum abgegeben wird. In dieser Zeit ist es erforderlich, verstärkt zu lüften und gegebenenfalls zu heizen, um die nach innen austrocknende Baufeuchte mittels Lüftung nach außen abzuführen.

Für die Austrocknung von Kalksandstein-Innenwänden können unter ungünstigen Klimarandbedingungen (20 °C, 65 % r.F.) näherungsweise folgende Anhaltswerte für die Zeit bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte abgeleitet werden:

- Wände der Dicke 11,5 cm: etwa 3 bis 6 Monate
- Wände der Dicke 24 cm: bis etwa 12 Monate
- Bei Lochsteinen sowie praxisgerechten Klimarandbedingungen sind deutlich kürzere Austrocknungszeiten zu erwarten [11]

8. Luftdichtheit

Eine möglichst luftdichte Ausführung der Gebäudehülle ist vor allem aus Feuchteschutzgründen von großer Bedeutung. Andernfalls kann warme, feuchte Raumluft durch Undichtheiten nach außen strömen und es kann an kalten Stellen innerhalb der Konstruktion zu Kondensatbildung und Schimmelpilzwachstum kommen. Dies kann letztlich zur Schädigung oder gar Zerstörung von Bauteilen führen.

Auch aus Sicht der Energieeinsparung ist die Luftdichtheit der Gebäudehülle relevant. Bei gut gedämmten Neubauten liegt der Anteil der Lüftungswärmeverluste bei freier Lüftung (Fensterlüftung) zwischen 30 und etwa 50 % der gesamten Wärmeverluste. Analog zu Wärmebrücken steigt der prozentuale Anteil mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehüllfläche. Dementsprechend ist darauf zu achten, dass die Gebäudehülle möglichst wenige ungeplante Undichtheiten aufweist, durch die ein unkontrollierbarer Luftwechsel stattfindet. Lüftungsanlagen (insbesondere mit Wärmerückgewinnung) können die Lüftungswärmeverluste reduzieren bei gleichzeitiger Sicherstellung einer guten Raumluftqualität und hohem Nutzerkomfort.

Hervorzuheben ist, dass die erforderliche Lüftung planmäßig über natürliche Lüftung (Fensterlüftung), Lüftungseinrichtungen (beispielsweise Außenluftdurchlass) oder mechanische Lüftung (Lüftungsanlage mit Ventilator) erfolgen soll, nicht durch mehr oder weniger zufällige Undichtheiten der Gebäudehülle. Der Luftdurchgang durch solche Undichtheiten ist zu stark von Wind- und Luftdrucksituation abhängig, um eine sichere, ausreichende und energieeffiziente Lüftung zu gewährleisten.

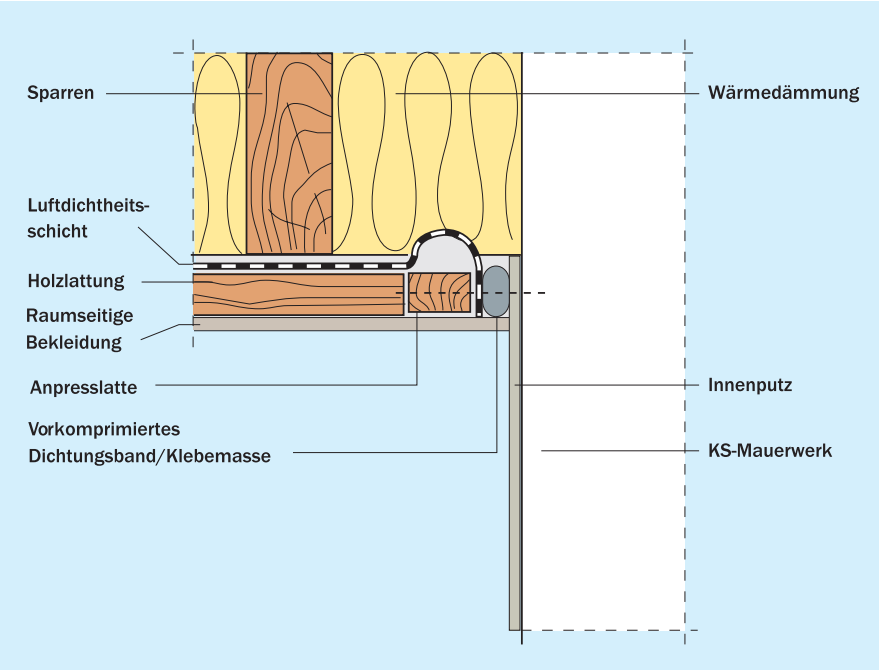


Bild 20 **Luftdichter Anschluss an eine verputzte KS-Wand nach DIN 4108-7 [14]**

Hinsichtlich der Luftdichtheit ist der Mauerwerksbau mit Kalksandstein aufgrund einfacherer und weniger fehleranfälliger Details im Vorteil gegenüber Leichtbauweisen.

Besondere Aufmerksamkeit erfordern:

- Bauteilanschlüsse im Dach- und Fensterbereich
- Durchdringungen im Dach
- Abschlüsse von Mauerkronen; sie sind durch Mörtelauflage oder Verwendung gedeckelter Steine herzustellen.
- Offene Lochkanäle der Mauersteine; sie sind mit Mörtelauflagen herzustellen.
- Bei Verwendung von KS-E-Steinen mit durchgehenden Lochungen sind die Kanäle am Wandkopf zu schließen und Steckdosen luftdicht anzuschließen.
- Mauerwerksbereiche hinter Einbauten wie beispielsweise abgehängten Decken, Spülkästen, Fußbodenleisten, Estrichaufbauten etc. sind vor Anbringen der Einbauten zu verputzen beziehungsweise die Fugen zu verspachteln, um die Luftdichtheit zu gewährleisten.
- Anschlüsse von Luftdichtheitsfolien an Wandbereiche sollten mechanisch gesichert werden, beispielsweise durch eine Anpressleiste mit untergelegtem Kompriband, oder durch Fixieren der Folie mit Rippenstreckmetall und Einputzen (Bild 20).

Kalksandsteine – auch KS-Lochsteine – werden in der Regel mit geschlossenem Deckel hergestellt, was vorteilhaft für Verarbeitung und Luftdichtheit ist.

INFO

KS-Mauerwerk selbst ist bereits bei einseitiger Verwendung von Dünnlagenputz oder bei Vermörtelung der Fugen luftdicht. Der Innenputz ist durchgehend über die gesamte lichte Höhe der Wand zu führen.

INFO

Bei Sichtmauerwerk ist das Mauerwerk besonders sorgfältig zu erstellen und auch die Stoßfugen vollflächig zu vermörteln.

Ausführungsempfehlungen und Hinweise werden exemplarisch in DIN 4108-7 gegeben, entbinden den Planer jedoch nicht von der Pflicht zu eigenverantwortlichem Planen. Die Luftdichtheit ist als eigenständige Planungsleistung zu begreifen und sorgfältig zu planen. Auch auf eine handwerklich gute Ausführung ist zu achten.

Die Ausführung sollte während der Bauphase kontrolliert und mittels Differenzdruckmessung (Blower-Door) nachgewiesen werden. Die Durchführung der Luftdichtheitsprüfung wird vom Gebäudeenergiegesetz nicht gefordert, jedoch ist die ausreichende Luftdichtheit eine geschuldete Eigenschaft. Voraussetzung für die Luftdichtheitsmessung ist, daß die luftdichte Schicht innerhalb der thermischen Gebäudehülle fertiggestellt ist. Die Messung erfolgt hinsichtlich der Fenster, Türen und sonstiger Öffnungen im späteren Gebrauchszustand: Außenfenster und Außentüren werden geschlossen, nutzungsbedingte Öffnungen bleiben offen. Eine Hilfestellung für die fachlich einwandfreie Vorbereitung eines Gebäudes für eine Luftdichtheitsmessung gibt beispielsweise der Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen in einer Broschüre [13]. Das Rechenverfahren des GEG sieht reduzierte rechnerische Lüftungswärmeverluste vor, wenn eine Luftdichtheitsprüfung durchgeführt und bestanden wird. Es ist anzuraten, die Luftdichtheit frühzeitig während der Bauphase nachzuweisen, solange Nachbesserungen noch möglich sind.

Für die mit dem Differenzdruckverfahren (Blower-Door-Test) nach dem nationalen Anhang NA zur DIN EN ISO 9972 geprüfte Luftdichtheit der Gebäudehülle gilt:

- Gebäude ohne raumlufttechnische Anlagen:
  - Mindestanforderung $n_{50} \leq 3{,}0\ h^{-1}$
  - angestrebt werden sollte $n_{50} \leq 2\ h^{-1}$
- Gebäude mit raumlufttechnischen Anlagen:
  - Mindestanforderung $n_{50} \leq 1{,}5\ h^{-1}$
  - Angestrebt werden sollte $n_{50} \leq 1{,}0\ h^{-1}$
- Niedrigenergie- und Passivhäuser:
  - angestrebt werden sollte $n_{50} \leq 0{,}6\ h^{-1}$

n_{50} ist der auf 50 Pa Druckdifferenz bezogene Prüfwert bei der Differenzdruckmessung.

9. Lüftung zum Feuchteschutz

In bewohnten Räumen wird der Luft ständig Feuchte durch die Nutzung zugeführt. Die Raumluftfeuchte hängt wesentlich von der Anzahl der Bewohner, der Wohnungsgröße und der Nutzungsart ab. Hohe Belegungsdichte, freies Wäschetrocknen, viele Pflanzen und Haustiere führen zu einer erhöhten Raumluftfeuchte. Bei üblichem Wohnverhalten können täglich bis zu etwa zehn Liter Wasser als Wasserdampf pro Wohnung freigesetzt werden (Bild 21).

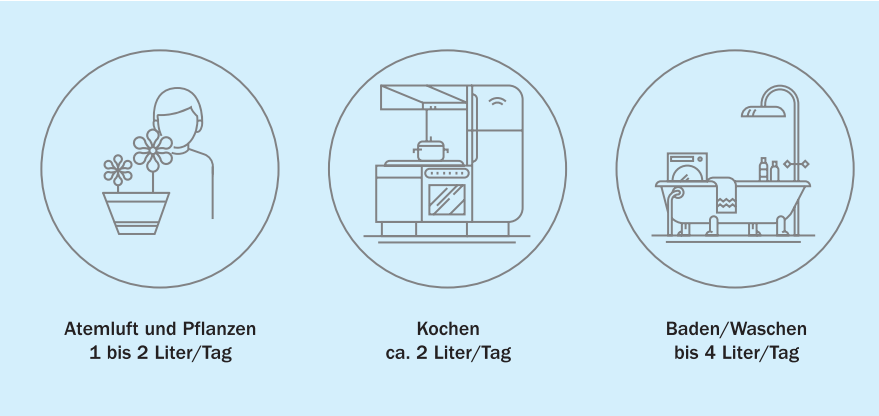


Bild 21 **Entstehung von Wasserdampf in einem Vier-Personen-Haushalt**

INFO

Außenwände können die anfallende nutzungsbedingte Feuchte nicht „wegatmen“ und auch nicht durch Diffusion abtransportieren. Die Feuchte muss durch Lüftung abgeführt werden. Im Vergleich zur Lüftung ist der Feuchtetransport durch die Außenwände infolge Diffusion verschwindend gering und trägt zur Feuchteabfuhr nur unwesentlich bei, selbst bei sehr diffusionsoffener Bauweise (Bild 22).

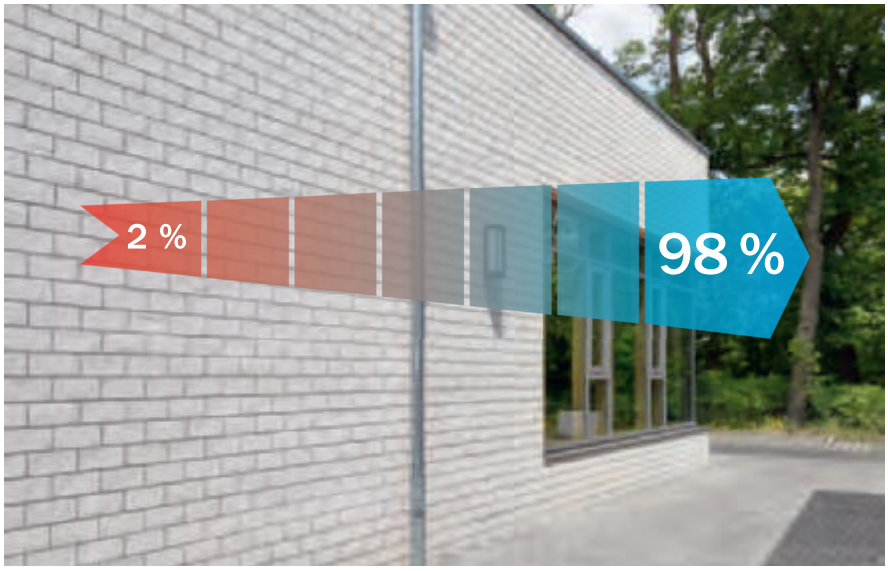


Bild 22 **Feuchtetransport aus Räumen findet zu 98 % über Lüftung und nur zu 2 % durch Diffusion statt**

Zur Vermeidung von Schimmelbildung auf Bauteilen und an Wärmebrücken sind nicht nur ein ausreichender Wärmeschutz der Bauteile und die Vermeidung von Wärmebrücken wichtig, sondern – neben einer ausreichenden und gleichmäßigen Beheizung - auch eine ausreichende Abfuhr der im Gebäude entstehenden Luftfeuchtigkeit mittels Lüftung. Überlegungen zum Lüftungskonzept des Gebäudes, d.h. wie die ausreichende Lüftung sichergestellt werden kann, gehören daher zum geschuldeten Planungsumfang.

Die ausreichende Lüftung kann wahlweise durch Fenster (freie Lüftung), Lüftungsöffnungen (beispielsweise Außenluftdurchlässe) oder mechanische Lüftung (Absaugung, Wandlüfter, Lüftungsanlagen) oder eine Kombination dieser Maßnahmen erreicht werden. Anhang D der DIN/TS 4108-8 enthält ein Flussdiagramm mit einem Überblick über verschiedene mögliche Verfahren zum Nachweis der Lüftung zum Feuchteschutz mit dem Ziel, eine Vermeidung und Bekämpfung der Lebensbedingungen von Schimmelpilzen unter Beachtung relevanter Zusammenhänge aus Bauphysik, Klima, Heizung und Lüftung zu unterstützen.

Planungs- und Auslegungsfestlegungen für die Wohnungslüftung finden sich u.a. in DIN 1946-6, die aber häufig auf eine Notwendigkeit für mechanische Lüftungsanlagen hinauslaufen. DIN/TS 4108-8 enthält in den informativen Anhängen E bis H ein alternatives Auslegungsverfahren für die Wohnungslüftung, welches den Nachweis mittels Fensterlüftung oder unter Anrechnung der Fensterlüftung gestattet. Hier finden sich auch Rechenbeispiele zu verschiedenen Nachweisverfahren der Lüftung zum Feuchteschutz.

10. Wärmeübertragung über das Erdreich

Die Bedeutung von Kellerräumen hat sich in jüngerer Zeit aufgrund steigender Grundstückspreise grundlegend verändert. Während der Keller früher hauptsächlich als Vorratslager und Abstellfläche genutzt wurde, wird er heute, insbesondere im Einfamilienhausbau, immer mehr in den eigentlichen Wohnbereich integriert. Eine grundlegende Voraussetzung für diese Entwicklung ist die Sicherstellung trockener Wand- und Deckenflächen, die dauerhaft gegen von außen einwirkendes Wasser und Feuchtigkeit von innen geschützt werden müssen. Mit der Nutzung als Aufenthaltsraum steigen auch die Ansprüche des Bauherrn an den Wohnkomfort und das Raumklima im Untergeschoss des Gebäudes. In diesem Fall müssen Außenwände und Bodenplatte einen entsprechenden Wärmeschutz aufweisen.

Für einzelne beheizte oder nur gelegentlich genutzte Räume bietet sich aus wirtschaftlichen Gründen eine auf den einzelnen Raum beschränkte Innendämmung an. Diese Ausführungsvariante ist auch als Nachrüstlösung bei Nutzungsänderungen prädestiniert, häufig als Ausbaureserve. Soll der größte Teil des Kellers beheizt werden, ist eine Kelleraußendämmung (Perimeterdämmung in Wand und Boden) sinnvoll. Der Vorteil der Perimeterdämmung liegt darin, dass Tauwasserausfall auf der Innenseite der Kellerwand und des Kellerbodens verhindert und die Bauwerksabdichtung mechanisch geschützt wird, Wärmebrücken vermieden bzw. vermindert werden, und die Dämmung in größeren Dicken dimensionierbar ist, da im Kellerraum kein Platz verlorengeht. Auch wenn zu Beginn keine hochwertige Kellernutzung geplant ist, ist es empfehlenswert, beim Bau des Gebäudes von vorneherein eine Perimeterdämmung einzubauen. Spätere Nutzungsänderungen sind dann problemlos möglich.

Der Wärmeverlust eines beheizten Kellers an das umliegende Erdreich stellt einen viel komplexeren Vorgang dar als der Wärmeverlust der übrigen Außenbauteile eines Gebäudes an die Außenluft. Die Wärmeverluste hängen ab von der Beschaffenheit des Erdreichs (bindiger bzw. nichtbindiger Boden), dem Wärmeschutz der Außenbauteile, der Grundwassertiefe, der Kellertemperatur und den Abmessungen des Kellers, die nach den Verfahren in DIN/TS 18599-2 und DIN EN ISO 13370 berechnet werden Der Wärmetransfer über das Erdreich kann numerisch zwei- oder dreidimensional nach DIN EN ISO 10211 berechnet werden.

10.1 Temperatur-Korrekturfaktoren F_x und Bodenplattenmaß B'

In der täglichen Praxis hat sich, anstelle einer numerischen Analyse, aber das vereinfachte Verfahren mit Temperatur-Korrekturfaktoren F_x durchgesetzt, wie es in DIN/TS 18599-2 enthalten ist. Dabei wird der U-Wert des erdberührten Bauteils als sogenannter „konstruktiver U-Wert“ einfach aus der Schichtenfolge des Bauteils unter Vernachlässigung des Erdreichs bestimmt. Der äußere Wärmeübergangswiderstand ist Null, da direkter Kontakt zum Erdreich besteht. Die Temperaturdifferenz, die das Bauteil bei Außenluftkontakt hätte, wird auf die niedrigere Temperaturdifferenz des erdberührten Bauteils korrigiert, mittels der in DIN/TS 18599-2 [15] tabellierten Temperatur-Korrekturfaktoren *Fx*. Die Geometrie des beheizten Kellerbereichs geht dabei über das charakteristische Bodenplattenmaß *B'* ein, welches grundsätzlich das Verhältnis aus beheizter Kellerbodenfläche zum exponierten (d.h. außenluftangrenzenden) Umfang dieser Fläche darstellt (Bild 23).

In der Praxis kommt es oft zu Unklarheiten, was zur Grundfläche zählt und welche Umfangsanteile als „exponiert“ gelten. DIN/TS 18599-2 gibt hierzu folgende Hilfestellung, wobei wahlweise auf das Gesamtgebäude oder den einzelnen Gebäudeteil abgestellt werden kann:

- Bezug auf das Gesamtgebäude:
  - Freistehende Wohngebäude und einzonig modellierte Nichtwohngebäude: *Ag* ist die Fläche der Bodenplatte auf Erdreich bzw. Kellerdecke des Gesamtgebäudes, *P* der exponierte Umfang.
  - Mehrzonig modellierte Gebäude: *Ag* kann die Fläche der Bodenplatte/Kellerdecke des Gesamtgebäudes sein, *P* der exponierte Umfang des Gesamtgebäudes. Das ermittelte *B'* gilt für alle Zonen.
  - Reihenhäuser: *Ag* kann die Fläche der Bodenplatten/Kellerdecken der gesamten Reihenhauszeile sein, *P* der exponierte Umfang der Zeile. Das ermittelte *B'* kann für Teile der Reihenbebauung verwendet werden.
- Bezug auf den einzelnen Gebäudeteil:
  - Zonenweise Betrachtung: *P* berücksichtigt nur den exponierten Umfangsanteil der Zone zur Außenumgebung oder zu unbeheizten Gebäudeteilen. *Ag* ist die Grundfläche der Zone.
  - Reihenhäuser: *P* ist der exponierte Umfangsanteil des Reihenhauses zur Außenumgebung oder zu unbeheizten Gebäudeteilen. *Ag* ist die Grundfläche des Reihenhauses.

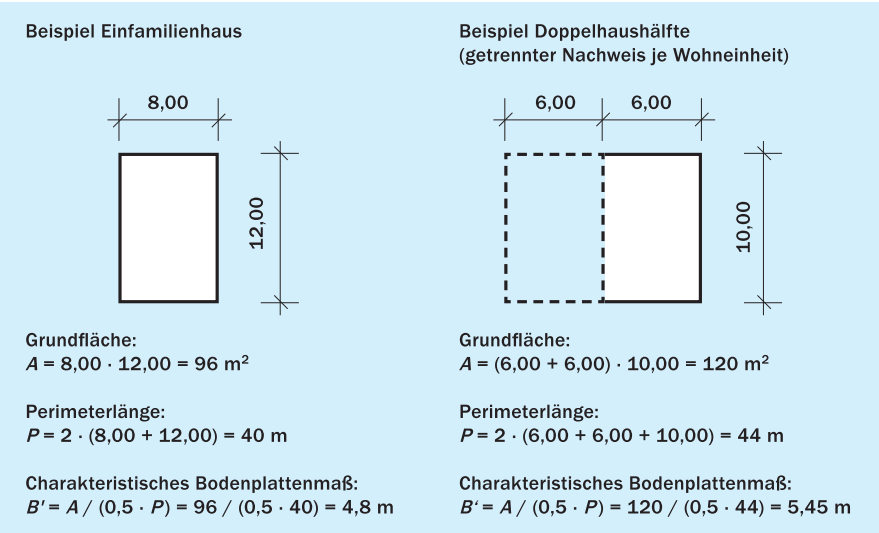


Bild 23 Bestimmung des charakteristischen Bodenplattenmaßes *B'* (Beispiele)

- Unbeheizte Räume außerhalb der Gebäudehülle werden bei *Ag* nicht berücksichtigt, die Wandlänge zu ihnen ist jedoch in P enthalten.
- Im Falle einer detaillierten Berechnung nach DIN EN ISO 13370 wird analog vorgegangen.
- Vereinfachend darf für alle Bauteile des unteren Gebäudeabschlusses $F_x = 0{,}8$ (für einen aufgeständerten Fußboden 0,9) angenommen werden, was aber häufig deutlich ungünstiger ist als der tatsächlich zutreffende Tabellenwert für F_x.
- Für den sommerlichen Wärmeeintrag und bei gekühlten Gebäuden sind die F_x-Werte nicht anwendbar. Hier sind der U-Wert und das Verfahren nach DIN EN ISO 13370 zu verwenden.

Aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz bei erdberührten Bauteilen ist die Wärmedämmung des Untergeschosses weniger ergiebig als bei Außenbauteilen. Als Kompromiss aus Energieeinsparung, Komfort und Kosten werden derzeit Perimeterdämmungen von etwa 12 cm Dicke als sinnvoll angesehen, bei Passivhäusern 20 bis 25 cm. Besondere Beachtung sollte der Reduzierung von Wärmebrücken im Bereich von Deckenauflagern und Fundamenten zukommen. Hilfestellung gibt Beiblatt 2 zu DIN 4108 mit Prinzipskizzen und Planungs- und Ausführungsempfehlungen.

Anhang

Tafel A1 Die wichtigsten Normen rund um den baulichen Wärme- und Feuchteschutz

Nummer der Norm	Titel	Inhalt und Hinweise
Grundlagennormen		
DIN 4108-2	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Mindestanforderungen, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung	Mindestanforderungen an den Wärmeschutz von flächigen Bauteilen und von Wärmebrücken (bauaufsichtlich eingeführt), Anforderungen und Nachweisverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz
DIN 4108-3	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung	Wasserdampfdiffusion, Glaserverfahren, Tauwasserberechnung, nachweisfreie Bauteile, Randbedingungen für Feuchtesimulationen (bauaufsichtlich eingeführt)
DIN 4108-4	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte	Zu verwendende Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit sowie Richtwerte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen von Bau- und Dämmstoffen (weitere Werte siehe DIN EN ISO 10456). Umrechnung vom Nennwert zum Bemessungswert für Dämmstoffe. Alternativ dürfen Bemessungswerte aus allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Bauartgenehmigungen oder vergleichbaren bauaufsichtlichen Regelungen verwendet werden.
DIN EN ISO 10456	Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte	Internationale „Schwester“-Norm zu DIN V 4108-4; enthält u.a. die λ-Werte für Beton, Holz, Holzprodukte
DIN 4108-10	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe	Anwendungstypen von genormten Dämmstoffen und dafür erforderliche Mindesteigenschaften. Alternative Festlegungen werden in produkt- oder bauartspezifischen Technischen Bestimmungen getroffen.
Planungs- und Ausführungsnormen		
DIN 4108-7	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele	Anforderungen und Prinzipskizzen zur luftdichten Ausführung der Gebäudehülle
DIN 4108 Beiblatt 2	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, mit CD-ROM	Prinzipskizzen für den bildlichen Nachweis sowie λ-Referenzwerte für den rechnerischen Nachweis der Gleichwertigkeit von linienförmigen Wärmebrücken, für den reduzierten pauschalen Wärmebrückenzuschlag
DIN/TS 4108-8	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden	Planungs- und Nutzungshinweise zur Schimmelvermeidung, für Neubau und Bestand, Heizungs- und Lüftungssysteme. Historische wärmeschutztechnische Anforderungen. Nachweisverfahren der Lüftung zum Feuchteschutz; Beispiele für freie Lüftung (Fensterlüftung) nach DIN 1946-6; Luftvolumenströme durch offene Fenster (Anhänge D bis H)
DIN 1946-6	Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung	Anforderungen und Empfehlungen für die Lüftung von Wohnungen, Mindestanforderungen für den Luftaustausch, Lüftung zum Feuchteschutz, Lüftungskonzepte; Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Instandhaltung von Lüftungsanlagen; für die freie und ventilatorgestützte Lüftung
Berechnungsnormen für Bauteile		
DIN EN ISO 6946	Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren	Standardwerte für R_{si} und R_{se}, Formeln für R und U, Behandlung von Luftschichten, Berücksichtigung niedrigemittierender Oberflächen bei Luftschichten, Korrekturwerte für den U-Wert
DIN EN ISO 10211	Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen	Vorgehensweise bei numerischen Berechnungen von zwei- und dreidimensionalen Wärmebrücken, Randbedingungen
DIN EN ISO 13370	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmetransfer über das Erdreich – Berechnungsverfahren	Detaillierte Berücksichtigung des Wärmetransports über das Erdreich (im Gegensatz zur vereinfachten Berücksichtigung über F_x-Werte, die aber nur für den Heizfall verwendet werden dürfen)

Tafel A1 **Die wichtigsten Normen rund um den baulichen Wärme- und Feuchteschutz** *Fortsetzung*

Nummer der Norm	Titel	Inhalt und Hinweise
DIN EN ISO 13789	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Transmissions- und Lüftungswärmetransferkoeffizient – Berechnungsverfahren	Wärmetransferkoeffizienten, detaillierte Berücksichtigung einiger Wärmetransportpfade
DIN EN ISO 10077-1	Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Allgemeines	Rechnerische Bestimmung des U-Werts von Fenstern
DIN EN ISO 10077-2	Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Numerisches Verfahren für Rahmen	Rechnerische Bestimmung des U-Werts von Fensterrahmen; enthält u.a. auch Gleichungen für den Wärmedurchlasswiderstand von schmalen Luftspalten
DIN EN ISO 12631	Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten	Rechnerische Bestimmung des U-Werts von Vorhangfassaden
Berechnungsnormen für Gebäude		
DIN V 18599-1 bis 11 (bis 2018) bzw. DIN/TS 18599-1 bis 13 (ab 2021 bzw. 2025)	Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung	Enthält folgende Teile: – 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger – 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen – 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung – 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung – 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen – 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau – 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau – 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungsanlagen – 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen – 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten – 11: Gebäudeautomation – 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude (entfällt mit der Ausgabe 2025) – 13: Tabellenverfahren für Nichtwohngebäude (entfällt mit der Ausgabe 2025) – Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich – Beiblatt 3: Überführung der Berechnungsergebnisse einer Energiebilanz nach DIN/TS 18599 in ein standardisiertes Ausgabeformat
Messnormen für Gebäude		
DIN EN ISO 9972	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren	Messverfahren für die Luftdichtheit der Gebäudehülle („Blower-Door"-Messung); Nachfolgenorm für DIN EN 13829

Tafel A2 Die wichtigsten physikalischen Größen, Formelzeichen und Einheiten rund um bauliche Wärmedämmung und klimabedingten Feuchteschutz

Physikalische Größe	Symbol	Einheit
Länge	l, ℓ	m
Breite	b	m
Dicke	d	m
Höhe	h	m
Fläche	A	m²
Volumen	V	m³
Masse	m	kg
Dichte	ρ	kg/m³
Celsius-Temperatur	θ, ϑ	°C
Thermodynamische Temperatur	T	K
Wärmemenge	Q	J = Ws
Spezifische Wärmekapazität	c	J/(kg·K)
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit	C_{wirk}	Wh/K
Wärmestrom	$\Phi, \dot{Q}$	Ws/s = Wh/h = W
Wärmestromdichte	$\dot{q}$	W/m²
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m·K)
Thermischer Leitwert	L	W/(m·K)
Wärmedurchlasswiderstand	R	m²·K/W
Wärmeübergangswiderstand innen/außen	R_{si}, R_{se}	m²·K/W
Wärmedurchgangswiderstand	R_{tot}	m²·K/W
Wärmeübergangskoeffizient	h	W/(m²·K)
Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	U	W/(m²·K)
Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient („Psi-Wert“)	ψ	W/(m·K)
Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient („Chi-Wert“)	χ	W/K
Temperaturfaktor an der Innenoberfläche	f_{Rsi}	–
Hemisphärischer Emissionsgrad	ε	–
Strahlungsaustauschgrad	E	–
Luftwechsel	n	h^{-1}
Wasserdampfteildruck	p	Pa
Wasserdampfsättigungsdruck	p_S	Pa
Relative Luftfeuchte	φ	%
Massebezogener / Volumenbezogener Feuchtegehalt	u_m, u_V	M.-% / Vol.-%
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	μ	–
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	s_d	m
Tauwassermasse, flächenbezogen	m_c	kg/m²
Verdunstungsmasse, flächenbezogen	m_{ev}	kg/m²
Wasseraufnahmekoeffizient	w	kg/(m²·$h_{0,5}$)
Wasserdampfdiffusionskoeffizient	D	m²/h
Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand	Z	m²·h·Pa/kg
Wasserdampfdiffusionsstromdichte	g	kg/(m²·h)

Literatur

[1] Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energietragern, Zugriff am 2025-08-21

[2] Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte, Zugriff am 2025-08-21

[3] DIN 4108-4:2020-11: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

[4] DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte

[5] DIN 4108-2:2025: Wärmeschutz – Mindestanforderungen, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung

[6] Pfundstein, M.; Gellert, R.; Spitzner, M.H.; Rudolphi, A.: Dämmstoffe – Grundlagen, Materialien, Anwendungen. Edition Detail, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München 2008

[7] DIN 4108 Beiblatt 2:2019-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele

[8] Spitzner, M.H.; Sprengard, Ch.; Simon, H.: Kalksandstein Wärmebrückenkatalog: Als Online-Planungshilfe unter www.ks-waermebruecken.de. Hrsg.: Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV, Hannover 2020

[9] FVHF-Richtlinie: Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden, Berlin 1998

[10] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Radon, I.; Künzel H. M.: Einfluss der Baufeuchte auf das hygrothermische Verhalten von Gebäuden, IBP Mitteilung 29, 2002

[11] Künzel H. M.: Austrocknung von Wandkonstruktionen mit Wärmedämm-Verbundsystemen. In: Bauphysik 20 (1998), Heft 1, Seite 18-23

[12] Schubert, P: Zur rißfreien Wandlänge von nichttragenden Mauerwerkwänden. Berlin: Ernst & Sohn. In: Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 473-488

[13] Anforderungen an den Prüfbericht nach DIN EN ISO 9972. FLiB-Broschüre, Ausgabe 3/2023. Hrsg.: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen, Berlin 2023

[14] DIN 4108-7:2011-01 und Neuausgabe 202: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie Beispiele

[15] DIN/TS 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen

Bildnachweise

Bild S. 332: UNIKA GmbH ;
Bild 2: Schulze-Darup;
Bild 20: Netter BauArt/Gerhard Illig/KS-ORIGINAL;
Bild 22, Bild Seite 367: Stefan Witte

Bild S. 333, Bild 23:
Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.