3. Bauphysikalische Grundlagen

Vorschriften zur Energieeinsparung und zum Klimaschutz führen zu konkreten Anforderungen an die bauphysikalischen Qualitäten von Gebäudehüllen. Neben der effizienten Nutzung von Heizenergie wirkt sich eine gute Wärmedämmung positiv auf den Wohnkomfort und die Gesundheit der Bewohner aus. Thermische Behaglichkeit sowohl im Sommer, als auch im Winter, bei gleichzeitiger Tageslichtnutzung und akustischem Komfort sind in hohem Maße an eine intelligente Nutzung des Baustoffs Glas gebunden. Die Zusammenhänge sind komplex, vielfältige Wechselwirkungen müssen beachtet werden.

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Grundlagen der Bauphysik. Es soll insbesondere diejenigen Kenntnisse vermitteln, die für das Verständnis der Wirkungsweise von Glas am Bau erforderlich sind.

3.1 WÄRME

3.1.1 Einleitung

Wärmeschutz zu jeder Jahreszeit ist eines der wichtigsten Gebiete der Bauphysik. Um die Nutzer von Gebäuden vor dem Verlust wertvoller Heizwärme, aber auch vor überhitzten Räumen zu schützen, müssen Bauwerke sorgfältig geplant werden.

Dieses Kapitel behandelt den winterlichen Wärmeschutz und erläutert die wichtigsten wärmeschutztechnischen Kenngrößen (zum sommerlichen Wärmeschutz siehe Kapitel 3.3 Sonne und Licht).

Begriffe, Symbole, Einheiten

Symbol	Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
λ	Lambda-Wert	Wärmeleitfähigkeit (Materialkennwert)	W/mK
U	U-Wert	Flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (Bauteil)	W/m^2K
Ψ	Psi-Wert	Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (lineare Wärmebrücke)	W/mK
χ	Chi-Wert	Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (punktförmige Wärmebrücke)	W/K
R_T	R_T-Wert	Wärmedurchgangswiderstand	m^2K/W
R_{si}	R_{si}-Wert	Wärmeübergangswiderstand raumseitge Oberfläche	m^2K/W
R_{se}	R_{se}-Wert	Wärmeübergangswiderstand außenseitige Oberfläche	m^2K/W
ε	Epsilon	Emissionsgrad von Oberflächen	–
$\sum$	Sigma	Mathematischer Operator für Summe	–
Δ	Delta	Mathematischer Operator für Differenz	–

3.1.2 Mechanismen des Wärmetransports

Die Wärme bzw. Wärmemenge ist physikalisch gesehen eine Energieform. Sie darf nicht mit der umgangssprachlichen „Wärme“ eines Körpers, der eine bestimmte Temperatur hat, verwechselt werden. Wärme wird in Joule angegeben. Damit Wärme sich in Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen bewegen kann, braucht es ein Temperaturgefälle. So wie Wasser immer den Berg hinunterfließt, strömt die Wärme immer von warm nach kalt. Der Wärmestrom ist die pro Zeit übertragene Wärmemenge, seine Einheit ist Joule pro Sekunde = Watt. Als Wärmestromdichte wird der durch eine bestimmte Fläche fließende Wärmestrom bezeichnet, er wird in Watt pro m^2 angegeben.

Die Temperatur wird durch die Celsius-Skala beschrieben, die durch die Eckpunkte 0 °C (Gefrierpunkt Wasser) und 100 °C (Siedepunkt Wasser) festgelegt ist. Die absolut tiefste Temperatur liegt bei minus 273,15 °C, tiefere Temperaturen gibt es im Universum nicht. Dort hat die Kelvin-Skala ihren Nullpunkt. Die Temperatur 0 °C entspricht umgerechnet 273,15 K. Ein Temperaturunterschied hat in beiden Einheiten – Kelvin und Grad Celsius – jeweils den gleichen Zahlenwert. Bewegt sich Wärme von einer wärmeren zu einer kälteren Stelle, geschieht dies grundsätzlich auf drei Arten: Durch Wärmeleitung, durch Konvektion und durch Wärmestrahlung.

Transportmechanismus	Erklärung
Wärmeleitung	Energietransport auf atomarer Ebene von Teilchen zu Teilchen, ohne dass die Materie selbst bewegt wird, d. h. in ruhender Materie.
Konvektion	Energietransport mit bewegter Materie (in Flüssigkeiten oder Gasen)
Wärmestrahlung	Energietransport durch elektromagnetische Strahlung, unabhängig von Materie, auch über große Entfernungen (funktioniert auch im Vakuum)

Im Alltag treten die drei Transportmechanismen oft gemeinsam auf: Ein Heizkörper gibt Wärmestrahlung ab, erwärmt durch Wärmeleitung die ihn umgebende Luft, und diese wiederum verteilt die Wärme durch Konvektion im Raum.

Bei Festkörpern ist **Wärmeleitung** der dominierende Effekt. Bei Metallen wird Wärme durch die Bewegung der freien Leitungselektronen weitergeleitet, in sonstigen Feststoffen durch Weitergabe der Schwingungsenergie von Atom zu Atom und in Gasen durch Übertragen der Energie bei Zusammenstößen der Moleküle oder Atome. Metalle sind besonders gute Wärmeleiter.

Die Fähigkeit eines Stoffes zur Weiterleitung von Wärme wird mit dem Materialkennwert der Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben. Der Wert λ eines Stoffes gibt die Wärmemenge in Watt an, die durch eine 1 m^2 große und 1 m dicke Schicht dieses Stoffes, d. h. durch einen Würfel mit dem Volumen 1 m^3, bei einem Temperaturunterschied der beiden Oberflächen von 1 Kelvin hindurchgeht. Es gilt: Je größer die Zahl, umso mehr Wärme wird pro Zeiteinheit übertragen bzw. umgekehrt: Je kleiner der Wert, umso besser dämmt das Material. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist W/m^2K.

Wärmeleitfähigkeiten λ nach DIN EN ISO 10077-2*

Material	Wärmeleitfähigkeiten λ
Aluminium (Si-Legierungen)	160 W/mK
Stahl	50 W/mK
Nichtrostender Stahl (austenitisch)	17 W/mK
Kalk-Natron-Silikatglas	1,0 W/mK
Hartholz	0,18 W/mK
PVC-U hart	0,17 W/mK
Weichholz	0,13 W/mK

*Die Anwendung von Prüfzeugnissen mit gemessenen Wärmeleitfähigkeiten ist bei wärmetechnischen Berechnungen nur dann zulässig, wenn es keine Tabellenwerte oder Daten aus Produktnormen oder technischen Zulassungen gibt. Die Messungen müssen von einer akkreditierten Stelle nach genau festgelegten Regeln durchgeführt worden sein. Damit der Wert für den jeweiligen Werkstoff repräsentativ ist, muss aus den Messwerten von mindestens drei unterschiedlichen Proben über eine statistische Bewertung ein Nennwert errechnet werden.

Konvektion ist mit einem Materietransport verbunden: Warme Materie bewegt sich von einem Ort höherer Temperatur zu einem Ort niedriger Temperatur. Da Teilchen nur in Flüssigkeiten oder Gasen räumlich beweglich sind, tritt Konvektion nur dort auf.

Wärmestrahlung wird von jedem Körper in Abhängigkeit von seiner Temperatur und seinem Emissionsvermögen ausgestrahlt. Als elektromagnetische Strahlung benötigt die Wärmestrahlung zur Fortbewegung keine Materie und kann sich auch im Vakuum ausbreiten. Allerdings ist je nach Wellenlänge nicht jedes Material für elektromagnetische Strahlung durchlässig (siehe Kapitel 3.3).

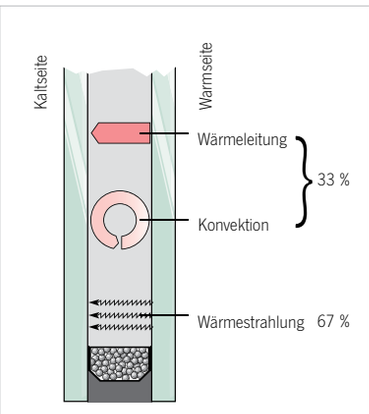
Der Emissionsgrad ε gibt an, wie viel Wärmestrahlung von einem Körper im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler, einem schwarzen Körper, abgegeben wird. Der Wert ist abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche, dimensionslos und liegt zwischen 0 und 1 (0 und 100 %). Ein Spiegel hat einen Emissionsgrad von fast null, eine mattschwarze Oberfläche kommt dem Maximalwert von 1 sehr nahe.

Emissionsgrade ε von Oberflächen nach DIN EN ISO 10077-2*

Beschreibung	Üblicher Emissionsgrad
Unbehandelte Aluminiumoberfläche	0,1
Leicht oxidierte Aluminiumoberfläche	0,3
Allgemeine metallische Oberflächen (einschließlich verzinkte)	0,3
Eloxierte, gestrichene oder pulverbeschichtete Oberflächen	0,9**
Unbeschichtetes Kalk-Natron-Silikatglas (gemäß DIN EN 572)	0,837
Beschichtete Gläser	0,10 bis 0,01

*Die Anwendung von Prüfzeugnissen mit niedrigeren Emissionsgraden als 0,9 ist bei wärmetechnischen Berechnungen nur dann zulässig, wenn es keine Tabellenwerte gibt. Nennwerte müssen von einer entsprechend akkreditierten Stelle an mindestens drei unterschiedlichen Proben geprüft und statistisch ausgewertet sein.
**Wert ändert sich nach Farbe/Oberfläche

Wärmetransport durch unbeschichtetes Isolierglas



Bei einfachem Isolierglas ohne Wärmedämmbeschichtung und Edelgasfüllung beträgt der Energieverlust ca. 1/3 durch Wärmeleitung und Konvektion und ca. 2/3 durch Abstrahlung.

Bei modernem Wärmedämm Isolierglas wird die Abstrahlung durch Wärmedämmbeschichtungen auf ein Minimum reduziert. Schlecht leitende Edelgasfüllungen und ein optimaler Scheibenabstand reduzieren Wärmeleitung und Konvektion.

3.1.3 Wärmedurchgangskoeffizienten

Um ganze Gebäude richtig auslegen zu können, werden nicht nur einzelne Materialkennwerte benötigt, sondern Angaben für komplette Bauteile wie z. B. Wand- und Deckenaufbauten, Verglasungen, Fenster oder Fassaden. Diese Bauteilkennwerte beschreiben bei definierten Randbedingungen die kompletten Wärmeverluste durch das Bauteil mit einem einzigen Zahlenwert. Bei ihrer Ermittlung werden sämtliche Mechanismen des Wärmetransports berücksichtigt, auch die Vorgänge an den außenliegenden Oberflächen.

Der Wärmedurchgangskoeffizient U eines Bauteils gibt an, welcher Wärmestrom in Watt bei einem Temperaturunterschied von 1 K zwischen Raumluft und Außenluft pro Quadratmeter Bauteilfläche durch das Bauteil hindurch verloren geht. Je kleiner der U-Wert, umso besser ist die Dämmwirkung des Bauteils. Die Einheit dieses flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten U ist W/m^2K.

Für Bauteile aus homogenen Materialschichten, wie z. B. eine Wand, legt die internationale Norm DIN EN ISO 6946 das Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U fest. Dabei wird der Weg der Wärme vom Rauminnern bis zur Außenluft in drei Schritte des Wärmeverlustes zerlegt, denen jeweils vom Bauteil ein Widerstand entgegengesetzt wird:

- Wärmeübergang von der Raumluft bis zur raumseitigen Bauteiloberfläche (überwiegend Wärmestrahlung und Konvektion) Wärmeübergangswiderstand R_{si}
- Wärmedurchlass im Innern des Bauteils (Wärmeleitung) Wärmedurchlasswiderstand R, der von den Wärmeleitfähigkeiten und Dicken der einzelnen Schichten abhängt
- Wärmeübergang von der äußeren Bauteiloberfläche zur Außenluft (überwiegend Wärmestrahlung und Konvektion) Wärmeübergangswiderstand R_{se}

Durch Addition dieser drei in Reihe geschalteten Vorgänge ergibt sich der gesamte Wärmedurchgangswiderstand R_T durch das Bauteil:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Die Übergangswiderstände R_{si} und R_{se} an den Bauteiloberflächen sind in der Norm in Tabellen festgelegt (si = surface internal, se = surface external).

Der U-Wert von Bauteilen aus homogenen Materialschichten ist der Kehrwert der Summe dieser drei Widerstände:

$$U = 1/R_T$$

Isoliergläser, Türen und Fenster sowie Vorhangfassaden sind von den Regelungen der DIN EN ISO 6946 ausgenommen. Auf Grund ihrer Komplexität werden sie wärmetechnisch in separaten Normen abgehandelt (siehe Kapitel 3.1.5 Glas, Fenster und Fassade).

3.1.4 Wärmebrücken

Wärme geht nicht nur über flächige Bauteile verloren, sondern auch über Wärmebrücken. Das sind Bereiche in der Gebäudehülle, bei denen mit erhöhtem Wärmeverlust gerechnet werden muss. Weil die raumseitige Oberflächentemperatur im Bereich von Wärmebrücken absinkt, ist dort das Risiko von Tauwasser- und Schimmelpilzbildung höher. Das ist nicht nur aus hygienischer Sicht bedenklich. Bei längerer Einwirkung von Feuchte und Schimmel wird unter Umständen auch die Bausubstanz beschädigt.

Es gibt geometrisch bedingte Wärmebrücken wie Gebäudeecken oder Deckenanschlüsse, materialbedingte wie Stahlstützen in Wänden oder kombinierte wie beim Fensteranschluss an die Wand oder auch im Übergangsbereich zwischen Glas und Fensterrahmen. Weil diese Wärmebrücken in der Regel nicht flächig, sondern in der Länge ausgedehnt sind, werden sie längenbezogen betrachtet. In einer thermischen Gebäudehülle können jedoch auch dreidimensionale, punktförmige Wärmebrücken auftreten.

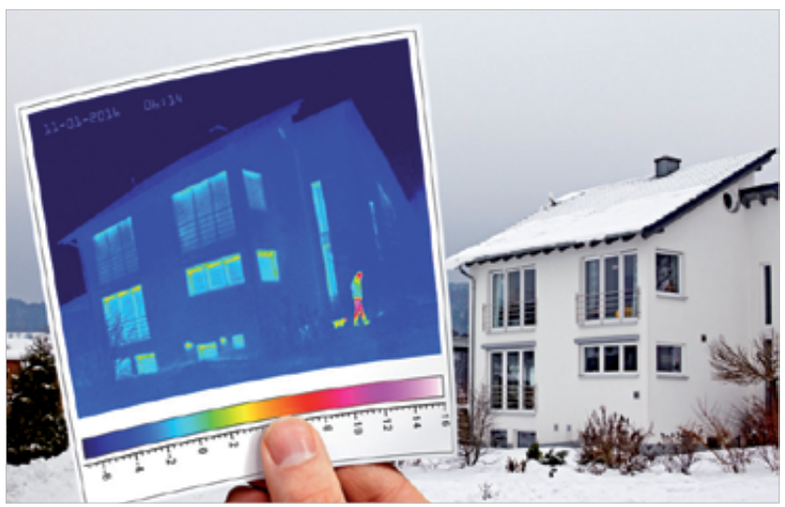
Die Wärmeverluste durch lineare Wärmebrücken werden mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ (griechischer Buchstabe Psi) angegeben. Je kleiner der Ψ-Wert, umso weniger trägt die Wärmebrücke zu den Gesamtwärmeverlusten bei. Die Einheit des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ ist W/mK.

Wärmeverluste durch punktförmige Wärmebrücken werden mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten χ (griechischer Buchstabe Chi) beziffert, die Einheit ist W/K. Allerdings ist der Wärmeverlust durch vereinzelt vorkommende punktförmige Wärmebrücken in der Regel vernachlässigbar. Bei einer Häufung wie z. B. bei den Verschraubungen von Pfosten-Riegel-Fassaden darf der wärmetechnische Einfluss jedoch nicht außer Acht gelassen werden (siehe Kapitel 3.1.5 Glas, Fenster und Fassade).

Durch immer besser gedämmte Gebäude fallen die Verluste über Wärmebrücken zunehmend ins Gewicht. Eine der wichtigsten Neuerungen der im Jahr 2002 in Deutschland eingeführten und seither stetig verschärften Energieeinsparverordnung (EnEV) – neben der Einführung von Europäischen Normen zur Ermittlung der Kennwerte – betrifft den Umgang mit Wärmebrücken. Während die alte Wärmeschutzverordnung Wärmebrücken noch weitgehend ignorierte, müssen seit 2002 bei der Berechnung von Gebäuden Wärmebrücken entweder pauschaliert angesetzt oder detailliert berechnet werden. Gebäude sind konstruktiv so auszuführen, dass Energieverluste über Wärmebrücken minimiert werden.

Die verschiedenen Wärmebrücken, die innerhalb von Fenster- und Fassadenkonstruktionen auftreten, sind bereits in die U-Werte von Fenstern (U_W) bzw. Fassaden (U_{CW}) eingerechnet und müssen bei der Gebäudeplanung nicht noch einmal berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 3.1.5 Glas, Fenster und Fassade). Die Wärmebrücken, die beim Einbau von Fenstern oder Fassadenelementen im Übergangsbereich zur Wand entstehen, sind jedoch in diesen Bauteilkennwerten nicht enthalten.
Die Tauwassergefahr von Wärmebrücken wird ebenfalls durch einen Kennwert beschrieben. Der Temperaturfaktor f kennzeichnet unabhängig von den jeweiligen Temperaturrandbedingungen die niedrigste raumseitige Oberflächentemperatur (hierzu mehr in Kapitel 3.2 Feuchte und Klima).

Info: Weil es die Wärme ist, die sich über die „Brücken“ bewegt, spricht die Bauphysik immer nur von Wärmebrücken und nicht von Kältebrücken. Kälte, d. h. die niedrigeren raumseitigen Oberflächentemperaturen entstehen als Folge des erhöhten Wärmestroms nach draußen und nicht durch Eindringen der Kälte von außen nach innen.



3.1.5 Glas, Fenster und Fassade

Die Wärmedämmung von Verglasungen, Fenstern und Fassaden hat sich in den letzten Jahren wesentlich verbessert. Insbesondere die hocheffizienten Dreifach-Wärmeschutzverglasungen haben Niedrigstenergie-, Passiv- und Plusenergiehäuser überhaupt erst möglich gemacht. Für ein möglichst einheitliches Dämmniveau, zur Vermeidung von vorprogrammierten Schäden in der thermischen Gebäudehülle sind jedoch verbesserte Rahmen- und Fassadenprofile sowie ein wärmetechnisch optimierter Einbau ebenfalls unerlässlich.

Verglasungen, Fenster und Fassaden sind komplex gestaltete Bauelemente, deren Wärmedurchgangskoeffizienten sich nicht einfach durch eine Reihenschaltung von Widerständen ermitteln lassen. Die Wärmeströme fließen nicht nur senkrecht durch ebene Bauteilflächen. Sie werden durch innere Hohlräume mit Konvektions- und Strahlungseinfluss, Wärmebrücken und geometrisch gestaltete Materialien mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten in viele Richtungen gelenkt. Rechnerisch lassen sich diese Effekte nur mit Finite-Elemente-Rechenprogrammen abbilden. Als Alternative hierzu ist in den Normen jeweils auch ein einfaches Tabellen-Ableseverfahren oder ein Verfahren zur messtechnischen Ermittlung angegeben. Dabei gilt generell: Je einfacher die Methode, umso unvorteilhafter der erzielte Wert.

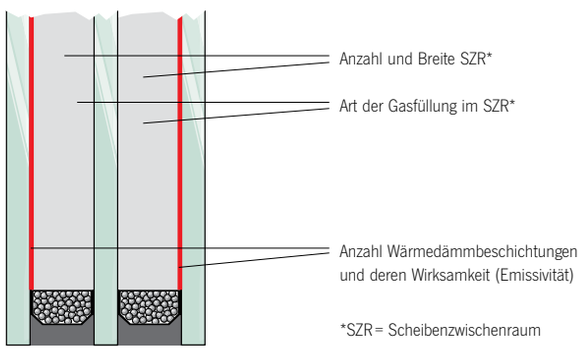
Relevante Normen für die wärmetechnischen Eigenschaften von Glas, Fenster und Fassade

Wärmedurchgangskoeffizient U von	Kenngröße	Index	Ermittlung nach Norm
Verglasungen mit ebenen und parallelen Oberflächen, auch Mehrscheiben-Isolierglas	U_g	g = glass	DIN EN 673 bzw. DIN EN 674
Fenstern, Türen und Abschlüssen	U_W	w = window	DIN EN ISO 10077 bzw. DIN EN ISO 12567
Vorhangfassaden	U_{CW}	cw = curtain wall	DIN EN ISO 12631

3.1.5.1 Der Wärmedurchgangskoeffizient U_g von Verglasungen

In der ungestörten Mitte einer Isolierglasscheibe geht die Wärme der Raumluft zunächst an die raumseitige Glasscheibe über, die sich dadurch erwärmt. Durch Emission von Wärmestrahlung gibt diese Scheibe ihre Wärme an die Außenscheibe (bei Dreifach-Isolierglas zunächst an die mittlere und dann an die äußere Scheibe) weiter. Darüber hinaus wird Wärme von der Raumseite über die Gasfüllung im Scheibenzwischenraum durch Wärmeleitung und durch Konvektion weitergegeben. Die Außenscheibe verliert die ankommende Energie hauptsächlich durch Emission von Wärmestrahlung und durch Konvektion an die Außenluft. Durch diesen kontinuierlichen Wärmestrom geht Heizwärme verloren, die durch die Raumbeheizung ersetzt werden muss.

Der U_g-Wert von Mehrscheiben-Isolierglas wird durch die drei in der Abbildung dargestellten Faktoren beeinflusst



Den größten Effekt auf U_g erzielen die Wärmedämmbeschichtungen (low-E-Schichten). Sie verhindern mit ihren geringen Emissionsgraden die Abstrahlung von Wärme nach draußen. Im Vergleich zu unbeschichtetem, luftgefülltem Isolierglas wird dadurch der U_g-Wert in etwa halbiert.

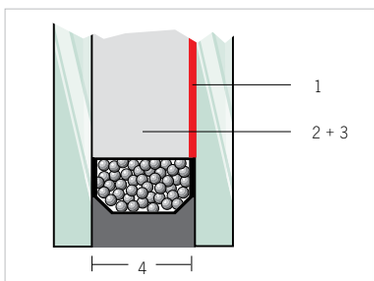
Edelgase reduzieren gegenüber luftgefülltem Isolierglas die Wärmeleitung im Scheibenzwischenraum und tragen dadurch ebenfalls zur Verbesserung (= Reduzierung) des U_g-Wertes bei. Dabei kommt es auf die Gasart sowie auf den Gasfüllgrad an, den der Isolierglashersteller in seiner Systembeschreibung festlegt (genaues Verfahren siehe Produktnorm für Mehrscheiben-Isolierglas DIN EN 1279-5). Je nach Gasart gibt es einen optimalen Scheibenabstand, bei dem der Einfluss der Konvektion minimiert ist und der U_g-Wert seinen niedrigsten Wert erreicht.

Natürlich lässt sich der U_g-Wert eines Zweifach-Isolierglases durch Hintereinanderschalten von mehreren Scheibenzwischenräumen weiter verbessern. Allerdings ist mit den heutigen Hochleistungs-Dreifachgläsern bereits das Optimum erreicht. Vierfach-Isoliergläser erzielen im Vergleich zum Aufwand nur eine geringe Verbesserung, bringen jedoch Nachteile an anderer Stelle (Gewicht, Klimalasten, g-Wert).

Grundsätzlich kann der U_g-Wert entweder nach DIN EN 673 berechnet oder nach DIN EN 674 gemessen werden. Als dritte Möglichkeit kann er in der Norm DIN EN ISO 10077-1 aus einer Tabelle je nach Aufbau, SZR und Gasart abgelesen werden. Das heute übliche Verfahren ist die Berechnung nach DIN EN 673. Der U_g-Wert ist mit einer Nachkommastelle anzugeben und so bei der weiteren Berechnung zu verwenden.

Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_g werden folgende Angaben benötigt

1) Emissivität der Glasoberflächen zum SZR
2) Die Art der Gasfüllung im SZR
3) Der Gasfüllgrad im SZR
4) Die Scheibenzwischenraumbreite



Für eine 2-fach Wärmedämmverglasung (Beschichtung mit einer Emissivität von 3 %, Argon-Gasfüllung im Scheibenzwischenraum mit einem Nenngasfüllgrad von 90 %) ergibt sich bei dieser Berechnung ein U_g-Wert von 1,1 W/m²K.

Die Wärmebrücke durch die leitende Verbindung im Randverbund der Isolierverglasung findet im U_g-Wert keinen Niederschlag, sie wird erst bei der Ermittlung von U_W bzw. U_{CW} berücksichtigt.

Eine weitere wichtige Kenngröße von Verglasungen ist der Gesamtenergiedurchlassgrad g (g-Wert). Der g-Wert ist dimensionslos. Er ist wichtig für die Ermittlung von solaren Gewinnen, d. h. für den kostenlosen Energieeintrag durch die Sonnenstrahlung von außen ins Rauminnere hinein. Im Winter ist dies sehr erwünscht, im Sommer kann es jedoch zu Überhitzung von Räumen kommen (siehe Kapitel 3.3 Sonne und Licht).

Auf eine Besonderheit des U_g-Wertes sei an dieser Stelle noch hingewiesen: Die U_g-Werte werden üblicherweise für den senkrechten Einbau angegeben. Bei geneigten Verglasungen ist der Konvektionseinfluss größer, weshalb sich der U_g-Wert mit zunehmender Neigung erhöht. Im CE-Zeichen bzw. in der Leistungserklärung wird immer der U_g-Wert für senkrechten Einbau angegeben. Auf Anforderung kann der tatsächliche U_g-Wert einer in einem bestimmten Winkel eingebauten Verglasung von den Glaslieferanten berechnet werden.

3.1.5.2 Der Wärmedurchgangskoeffizient U_W von Fenstern

Die Wärmeverluste an Fenstern setzen sich aus Wärmeströmen durch die Rahmenprofilflächen und durch die Verglasung zusammen. Hinzu kommt dort, wo Rahmen und Glas zusammentreffen, der Verlust über eine geometrische und materialbedingte Wärmebrücke. Der erhöhte Wärmestrom in diesem Bereich wird hauptsächlich vom Material des Isolierglas-Randverbunds und daneben noch von der Tiefe des Glaseinstands bestimmt (siehe auch Kapitel 3.1.5.4 Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter).

Bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_W führen mehrere Wege zum Ziel. Folgende Vorgehensweisen (Wege 1 bis 3) sind gemäß der Produktnorm für Fenster, DIN EN 14351-1, als Basis für CE-Kennzeichnung und Leistungserklärung zulässig:

Weg 1: Der U_W-Wert eines vertikalen Fensters mit der Abmessung 1,23 x 1,48 m kann für einen bestimmten Verglasungswert U_g und Rahmenprofilwert U_f direkt aus den Tabellen H.1 bis H.4 im Anhang H der DIN EN ISO 10077-1 abgelesen werden.

Da dies eine starke Vereinfachung darstellt, wird jeweils der ungünstigste Fall angenommen. Deshalb sind die erreichbaren Werte nicht besonders vorteilhaft. (Dies gilt generell für alle vereinfachten Vorgehensweisen mit Tabellen und Diagrammen zum Ablesen von Werten).

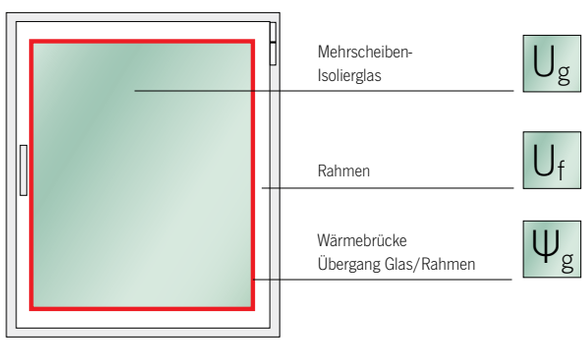
Rahmenflächenanteil	**30 %**	**20 %**
Konventionelle Abstandhalter aus Aluminium oder Stahl	Tabelle H.1	Tabelle H.2
Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter	Tabelle H.3	Tabelle H.4

3.

Weg 2: Berechnung des U_W-Wertes gemäß DIN EN ISO 10077-1 aus den drei Eingangsgrößen U_g, U_f und Ψ_g, die mit der Summenformel nach ihrem Flächenanteil bzw. ihrer Länge gewichtet werden:

$$U_W = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + L_g \cdot \Psi_g}{A_W}$$

A bezeichnet jeweils die Flächen von Glas (A_g), Rahmen (A_f) und Gesamtfenster (A_W). Dabei ist A_g nicht die gesamte Fläche der eingeglasten Scheibe, sondern der Teil, der sichtbar bleibt. Ebenso ist L_g nicht der gesamte Scheibenumfang, sondern die sichtbare Länge des Glasrandes.



Auch für die Bestimmung der drei Eingangsgrößen U_g, U_f und Ψ_g gibt es nach dem Motto „Tabelle – Messen – Rechnen“ wieder mehrere Möglichkeiten:

Wärmedurchgangskoeffizient von	**Kenngröße**	**Index**	**Vorgehensweise**
Verglasung	U_g	g = glass	siehe 3.1.5.1
Rahmen	U_f	f = frame	Ablesung aus Tabellen und Diagrammen der DIN EN ISO 10077-1
			Detaillierte Berechnung nach DIN EN ISO 10077-2
			Messung mit Heizkastenverfahren nach DIN EN 12412-2
Wärmebrücke Übergangsbereich Glas zu Rahmen	Ψ_g		Ablesung aus Tabellen der DIN EN ISO 10077-1
			Detaillierte Berechnung nach DIN EN ISO 10077-2
			Verwendung von repräsentativen Ψ_g-Werten nach ift-Richtlinie WA-08 (BF-Datenblätter, siehe auch Kapitel 3.1.5.4

3.

Dabei nennt die DIN EN ISO 10077-1 als bevorzugtes Verfahren für die Ermittlung von U_f und Ψ_g die zweidimensionale numerische Berechnung nach Teil 2 dieser Norm mit geeigneten Berechnungsprogrammen. Der Aufwand für solche FEM-Berechnungen ist jedoch nicht unerheblich. Auf Ablesung aus Tabellen oder Diagrammen soll nur dann zurückgegriffen werden, wenn keine anderen Angaben vorliegen.

Als Königsweg für die Ψ_g-Werte haben sich die Datenblätter des BF Bundesverband Flachglas mit repräsentativen Psi-Werten für Fenster etabliert. Diese Vorgehensweise ist nicht so aufwändig wie die detaillierte Berechnung, liefert aber trotzdem präzisere und je nach verwendetem Abstandhaltersystem vorteilhaftere U_W-Werte als das Tabellenverfahren (siehe Kapitel 3.1.5.4 Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter).

Weg 3: Messung des U_W-Wertes mit dem Heizkastenverfahren gemäß DIN EN ISO 12567-1/2. Durch diese Messung ergibt sich ein Einzelwert, der alle Einflüsse von Rahmen, Verglasung und Wärmebrücke erfasst. Allerdings enthält dieser Wert keinerlei Aussage über die einzelnen wärmetechnischen Qualitäten der Fensterbestandteile Verglasung, Rahmen und Wärmebrücke. Deshalb lassen sich damit keine individuellen U_W-Werte für andere Abmessungen berechnen.

Grundsätzlich ist der U_W-Wert mit zwei wertanzeigenden Stellen anzugeben, d. h. bei Werten ≥ 1,0 W/m²K mit einer Nachkommastelle (z. B. U_W = 1,3 W/m²K), und ab Werten unter 1,0 W/m²K mit zwei Nachkommastellen (z. B. U_W = 0,85 W/m²K).

Eine Besonderheit des U_W-Wertes ist seine Abhängigkeit von Format (Größe, Verhältnis Breite zu Länge) und Gestaltung (einflügelig, zweiflügelig, mit Oberlicht usw.).

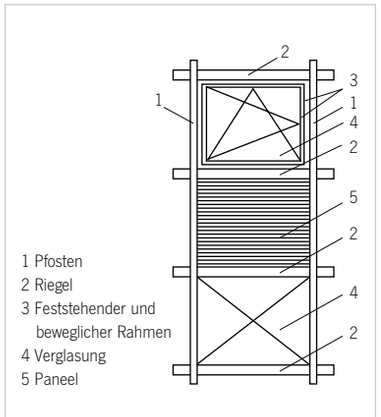
Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde im Zuge der Normung ein einflügeliges Fenster mit der Abmessung 1,23 x 1,48 m als Standard für die CE-Kennzeichnung festgelegt. Dieses Standardfenster ist für die meisten Fenstergestaltungen repräsentativ (außer für Stulpfenster und Stulpfenster mit Oberlicht).

In der Praxis ist jedoch nicht jedes Fenster einflügelig und hat die Maße 1,23 x 1,48 m. Deshalb können von Planern für die genaue Berechnung der Wärmeverluste von Gebäuden auch individuelle U_W-Werte für jedes einzelne Fenster gefordert werden. Eine gemischte Angabe an einem Objekt ist allerdings nicht zulässig (entweder alle Fenster genau oder alle mit dem Wert des Standardfensters).

Die wärmetechnische Behandlung von Sprossenfenstern wird in Kapitel 3.1.5.5 näher erläutert.

3.1.5.3 Der Wärmedurchgangskoeffizient U_{CW} von Fassaden

Ebenso wie Fenster werden auch Fassaden auf Basis einer Produktnorm – der Produktnorm für Vorhangfassaden DIN EN 13830 – mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet. Im CE-Zeichen muss zusammen mit anderen Leistungseigenschaften der Wärmedurchgangskoefficient U_{CW} der Vorhangfassade angegeben werden. Unterschiedliche Typen von Vorhangfassaden sind Elementfassaden, Pfosten-Riegel-Konstruktionen, Trockenverglasungen, geklebte Glaskonstruktionen, hinterlüftete Fassaden, usw.



Was für die Ermittlung des Fenster U_W-Wertes die DIN EN ISO 10077, ist für Fassaden die DIN EN ISO 12631 „Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten".

Diese Norm legt fest, wie Wärmedurchgangskoeffizienten für Vorhangfassaden aus verglasten und/oder opaken Paneelen, die in Rahmen eingebaut oder mit Rahmen verbunden sind, ermittelt werden.

Schon allein aus der Fülle an tiefgestellten Indizes zu U- bzw. Ψ-Werten ist zu ersehen, dass das Thema bei Vorhangfassaden komplex ist:

f	Rahmen – frame
g	Verglasung – glazing
f,g	Rahmen/Verglasung
m	Pfosten – mullion
m,f	Pfosten/Rahmen
m,g	Pfosten/Verglasung
p	Opakes Paneel – panel
t	Riegel – transom
t,f	Riegel/Rahmen
t,g	Riegel/Verglasung
w	Fenster – window
cw	Vorhangfassade – curtain wall

In dieser Rechennorm sind zwei Verfahren beschrieben, die beide zum Ziel U_{CW} führen:

a) Ein vereinfachtes Beurteilungsverfahren, bei dem der Wärmeübergang durch die gesamte Konstruktion einschließlich Pfosten, Riegel und Füllungen mittels Computersimulation berechnet wird.
b) Ein Verfahren mit Beurteilung der einzelnen Komponenten, bei dem ein repräsentatives Element in Flächenanteile mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften unterteilt wird.

Beim Verfahren a) werden sämtliche Flächen außer den Füllungen (Glas und Paneel) zu einem flächenbezogenen Fugen-U-Wert U_{TJ} oder zu einem längenbezogenen Fugen-Psi-Wert Ψ_{TJ} zusammengefasst, jeweils mit dem Index TJ für „Fuge zwischen zwei Füllungen". U_{CW} ergibt sich aus den U-Werten für Glas, Paneel und Fugen.

Bei Verfahren b ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient U_{cw} der gesamten Fassade als Mittelwert aus den Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bereiche, jeweils mit ihrem Flächenanteil gewichtet plus den diversen linearen Wärmebrücken bezogen auf deren Länge, gemäß nachstehender Gleichung:

$$U_{cw} = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_p U_p + \sum A_f U_f + \sum A_m U_m + \sum A_t U_t + \sum l_{f,g}\Psi_{f,g} + \sum l_{m,g}\Psi_{m,g} + \sum l_{t,g}\Psi_{t,g} + \sum l_p \Psi_p + \sum l_{m,f}\Psi_{m,f} + \sum l_{t,f}\Psi_{t,f}}{A_{cw}}$$

Dabei ist

U_g / U_p	der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung und des Paneels
U_f / U_m / U_t	der Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens, des Pfostens und des Riegels
$\Psi_{f,g}$ / $\Psi_{m,g}$ / $\Psi_{t,g}$ / Ψ_p	der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge der kombinierten thermischen Wirkungen der Verglasung oder des Paneels und des Rahmens oder des Pfostens oder des Riegels
$\Psi_{m,f}$ / $\Psi_{t,f}$	der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient infolge der kombinierten thermischen Wirkungen von Pfosten/Rahmen und Riegel/Rahmen

Die Fläche der Vorhangfassade A_{cw} wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A_{cw} = A_g + A_p + A_f + A_m + A_t$$

Dabei ist

A_{cw}	die Fläche der Vorhangfassade
A_g	die Gesamtfläche der Verglasung
A_p	die Gesamtfläche der Paneele
A_f	die Gesamtfläche der Rahmen
A_m	die Gesamtfläche der Pfosten
A_t	die Gesamtfläche der Riegel

Wie bei Fenstern wird der U_g-Wert der Verglasung nach DIN EN 673 oder 674 beurteilt. Der U_p-Wert von opaken Paneelen ist nach DIN EN ISO 6946 zu bestimmen. U_f-Werte für Rahmen können z. B. nach DIN EN ISO 10077-1 oder -2 ermittelt werden.
Die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von Verglasungen Ψ_g können den Tabellen im Anhang B der Norm entnommen oder nach DIN EN ISO 10077-2 detailliert berechnet werden.

Herkunft der Eingabedaten für die Berechnung von U_{cw}

Werte des Wärmedurchgangskoeffizienten	Herkunft
U_g	DIN EN 673, DIN EN 674
U_f	DIN EN 12412-2, DIN EN ISO 10077-1, DIN EN ISO 10077-2
U_m / U_t	DIN EN 12412-2, DIN EN ISO 10077-2 (und Anhang C)
Ψ_g und Ψ_p und $\Psi_{m,f}$ / $\Psi_{t,f}$	Anhang B, DIN EN ISO 10077-2
U_p	DIN EN ISO 6946

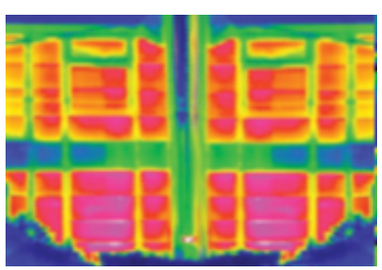
Alternativ zu den beiden Berechnungsverfahren ist ebenso wie bei Fenstern eine Prüfung von Fassadenelementen nach DIN EN ISO 12567-1 (Messung nach dem Heizkastenverfahren) zugelassen.

3.1.5.4 Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter (Warme Kante)

Die Wärmedämmung von Fenstern und Fassaden wurde in den letzten Jahren wesentlich verbessert. Wärmedämmbeschichtungen und Gasfüllungen bedeuteten für Isolierglas einen technologischen Quantensprung. Auch die Rahmenkonstruktionen wurden wärmetechnisch weiterentwickelt. Damit fällt zwangsläufig die Einbauwärmebrücke des Glases im Rahmen und im Fassadenprofil stärker ins Gewicht. Der Effekt dieser wärmetechnischen Schwachstelle wird umso deutlicher, je besser Rahmenkonstruktion und Verglasung dämmen.

Konventionelle Isolierglas-Abstandhalter aus Aluminium oder Stahl führen zu deutlich höheren Wärmeverlusten in diesem Bereich und damit konsequenterweise zu schlechteren U_w- und U_{cw}-Werten als die neuen, wärmetechnisch verbesserten Randverbundsysteme. Diese so genannten „Warme-Kante-Systeme“ verringern den Wärmestrom im Übergangsbereich von Glas zu Rahmen und verhindern damit ein übermäßiges Absinken der Oberflächentemperatur an der raumseitigen Glaskante.

Gut wärmedämmende Verglasungen, Rahmenkonstruktion und Randverbund. Eine wirkungsvolle Isolation bis über den Rand hinaus.



Alte Fenster, wie vor 1990 üblicherweise eingebaut, isolieren so schlecht, dass der schwache Rand nicht weiter auffällt.

Wie bereits im Abschnitt 3.1.5.2 beim U_W-Wert von Fenstern dargestellt, wird der erhöhte Wärmedurchgang durch den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ_g bemessen. Da es sich nicht um einen Materialkennwert, sondern um die Beschreibung eines physikalischen Vorgangs handelt, ist der Ψ_g-Wert nicht nur abhängig von den Wärmeleitfähigkeiten des verwendeten Isolierglas-Randverbunds, sondern auch vom Dämmniveau des verwendeten Rahmens und des Isolierglases sowie von der Tiefe des Glaseinstands im Rahmen. Deshalb gibt es für ein bestimmtes Abstandhaltersystem nicht einfach nur einen einzigen Ψ_g-Wert. Auch bei Kenntnis der Verglasung lässt sich noch keine Aussage zur Größe Ψ_g machen. Erst wenn alle Teile zusammenkommen, kann der Ψ_g-Wert ermittelt werden. Grundsätzlich ist das auf drei Arten möglich:

- Ablesung aus Tabellen der DIN EN ISO 10077-1 für U_W bzw. DIN EN ISO 12631 für U_{CW}
- Detaillierte Berechnung nach DIN EN ISO 10077-2
- Verwendung von repräsentativen Ψ_g-Werten für Fenster bzw. für Fassadenprofile

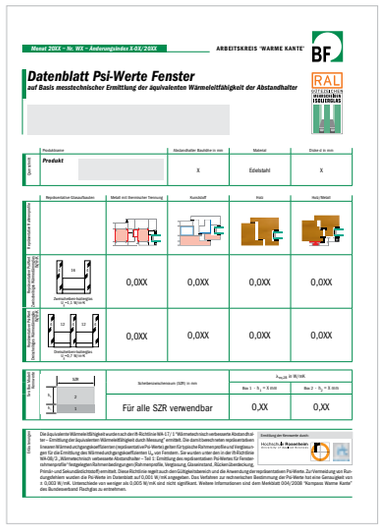
Für die einfache Tabellenablesung stellen die beiden Normen DIN EN ISO 10077-1 bzw. DIN EN ISO 12631 jeweils Tabellen mit Ψ-Werten für „typische Abstandhalter aus Aluminium oder Stahl“ bzw. „Abstandhalter mit wärmetechnisch verbesserten Eigenschaften“ zur Verfügung.

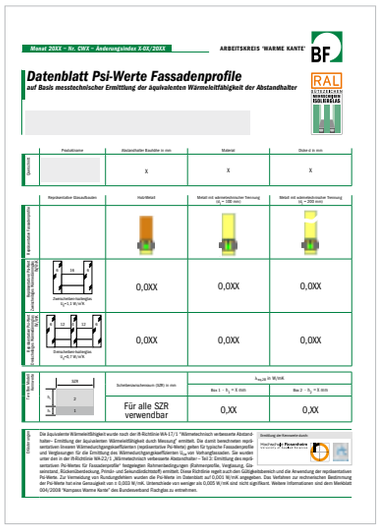
Damit der Anwender entscheiden kann, welche der beiden Tabellen die richtige ist, definieren die beiden Normen in identischer Weise, was unter einem wärmetechnisch verbesserten Abstandhalter zu verstehen ist. Es ist zu beachten, dass die Ψ_g-Werte für Festverglasungen in Pfosten-Riegel-Fassaden konstruktionsbedingt deutlich höher liegen als die Werte für den Glasrand bei Fensterflügeln.

Die detaillierte Berechnung erfolgt für Fenster und für Fassaden nach dem in DIN EN ISO 10077-2 beschriebenen numerischen Verfahren. Dafür ist geeignete Software erforderlich. Wird das verwendete Abstandhaltersystem geändert, muss die komplette Berechnung erneut durchgeführt werden.

Deutlich einfacher als die detaillierte Berechnung und dennoch präziser als die einfache Tabellenablesung geht die Ermittlung von U_W bzw. U_{CW} mit den repräsentativen Ψ-Werten der BF Datenblätter für wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter. Diese dritte Vorgehensweise wurde vom Arbeitskreis Warme Kante beim Bundesverband Flachglas (BF) erarbeitet. Die Datenblätter gelten jeweils für ein individuelles Abstandhaltersystem. Ihre Anwendung ist durch ift-Richtlinien an die Einhaltung bestimmter Randbedingungen gekoppelt. Inzwischen ist dieses Verfahren auch normativ anerkannt.

Die Anwendbarkeit der Datenblätter für Fenster bzw. für Fassadenprofile wird jeweils durch eine ift-Richtlinie geregelt.





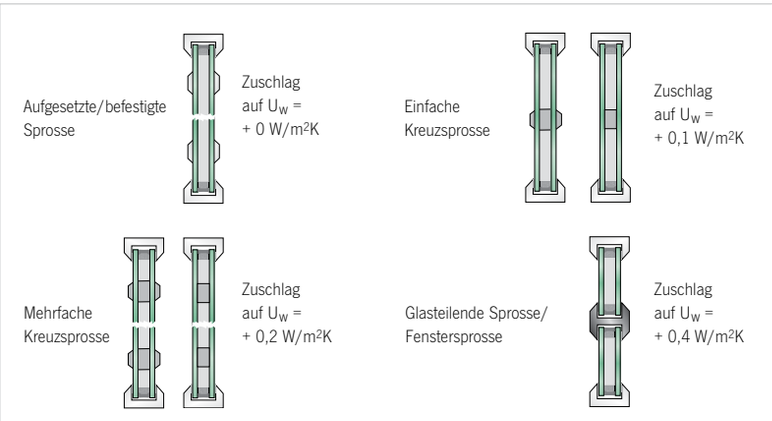
BF Datenblatt	Psi-Werte Fenster	Psi-Werte Fassadenprofile
Gültig für	Fenster	Festverglasungen in Pfosten-Riegel
Anwendung geregelt durch	ift-Richtlinie WA-08: Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter, Teil 1: Ermittlung des repräsentativen Psi-Wertes für Fensterrahmenprofile	ift-Richtlinie WA-22: Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter, Teil 3: Ermittlung des repräsentativen Psi-Wertes für Fassadenprofile

Weitergehende Infos: siehe SANCO AWT Info BF-Merkblatt „Kompass Warme Kante für Fenster und Fassaden“ oder www.bundesverband-flachglas.de/downloads/bf-datenblaetter-fenster **oder** /downloads/bf-datenblaetter-fassadenprofile

3.1.5.5 Wärmetechnische Behandlung von Sprossenfenstern

In der Vergangenheit wurde der Einfluss von Sprossen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern oft vernachlässigt. Obwohl die Sprossen im Scheibenzwischenraum nicht an den Glasoberflächen anliegen dürfen (Glasbruchgefahr), können sie doch lineare Wärmebrücken bilden und damit den Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern nachteilig beeinflussen.

Seit dem 1.12.2010 sind gemäß der Produktnorm DIN EN 14351-1 für die CE-Kennzeichnung von Fenstern mit Sprossen die nachfolgenden Aufschläge auf den U_W-Wert zu verwenden:



Bei diesen Aufschlägen wird nicht unterschieden, ob es sich um konventionelle Sprossen aus Aluminium oder um wärmetechnisch verbesserte Ausführungen aus Kunststoff handelt und welche Sprossenlängen insgesamt verbaut sind. Auch werden die unterschiedlichen Sprossenarten nicht differenziert betrachtet. Es spielt für die Aufschläge auch keine Rolle, ob sich bei Dreifach-Isolierglas Sprossen nur in einem oder in beiden Scheibenzwischenräumen befinden. Da es sich um eine grobe Vereinfachung handelt, sind die Aufschläge in vielen Fällen unangemessen hoch.

Nach detaillierter Untersuchung des Themas in einem Forschungsvorhaben wurde deshalb vom Bundesverband Flachglas vorgeschlagen, die Wärmebrückenwirkung von Sprossen ebenso wie beim Glasrandverbund mit linearen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ_{gb} abzubilden, in Abhängigkeit von der tatsächlich verbauten Sprossenlänge l_{gb}, und diese pauschalen Ψ_{gb}-Werte in Tabellenform in den Anhang der DIN EN ISO 10077-1 aufzunehmen.

Der im Oktober 2016 veröffentlichte Normentwurf enthält nun zwei Tabellen mit Ψ_{gb}-Werten für Sprossen im Scheibenzwischenraum, einmal für metallische Sprossen und einmal für Sprossen aus Kunststoff.

Für die Berechnung des U_W-Wertes eines Sprossenfensters wird die Summenformel um den Sprosseneinfluss erweitert:

$$U_W = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + L_g \cdot \Psi_g + L_{gb} \cdot \Psi_{gb}}{A_W}$$

Für den Vergleich mit einem identischen Fenster ohne Sprossen lässt sich der sprossenbedingte Aufschlag wie folgt berechnen:

$$\Delta U_W = \frac{L_{gb} \cdot \Psi_{gb}}{A_W}$$

Weitere Informationen zur wärmetechnischen Behandlung von Sprossen sind im SANCO AWT Info BF-Merkblatt „Kompass Warme Kante für Fenster und Fassaden“ enthalten.

3.2 FEUCHTE UND KLIMA

3.2.1 Einleitung

Zu behaglichem Wohnen und einer förderlichen Arbeitsumgebung gehört nicht nur eine angenehme Raumlufttemperatur. Auch die Luftfeuchtigkeit spielt eine Rolle für unser Wohlbefinden in Räumen. Kälteempfinden in der Nähe der Gebäudehülle, wie beispielsweise direkt neben schlecht gedämmten Fenstern oder Glasfassaden wird durch Strahlungswärmeverluste des menschlichen Körpers ausgelöst und beeinflusst die gefühlte Temperatur im Raum. Kaltluftabfall an den raumseitigen Oberflächen der Außenhülle des Gebäudes löst unangenehme „Zugluft"-Erscheinungen aus. Moderne Hochleistungsgläser helfen, solche Effekte zu vermeiden. Allerdings ist das Behaglichkeitsempfinden stark von der subjektiven Wahrnehmung der Nutzer abhängig. Trotzdem können für ein Raumklima zumindest Bereiche definiert werden, in deren Grenzen sich die meisten Nutzer wohl fühlen.

Um die Gesundheit der Bewohner zu schützen und die Bausubstanz eines Gebäudes zu erhalten, müssen Bauschäden durch Schimmelbildung und Durchfeuchtung vermieden werden. Wasser kann jedoch nicht nur in flüssigem Zustand eindringen, sondern innerhalb von Gebäuden an unerwarteten Stellen auch in großer Menge durch Kondensieren aus feuchter Luft entstehen.

Deshalb muss sich bereits der Planer eines heutigen luftdicht gebauten Gebäudes mit dem Thema Feuchteschutz auseinandersetzen. Die bauphysikalischen Qualitäten der Gebäudehülle lassen sich später kaum noch nachbessern. Klimagerechtes Bauen erfüllt die drei Kernforderungen:

- Mensch und Tier, Produktionen und Lagergut vor Witterung zu schützen
- Ein für die Bedürfnisse der Nutzer angemessenes Raumklima zu schaffen
- Klimabedingte Schäden am Gebäude zu vermeiden.

Dieses Kapitel behandelt Grundbegriffe und Kenngrößen zum Thema Feuchteschutz, erläutert die Klimabedingungen für Behaglichkeit sowie Tauwassererscheinungen an Isoliergläsern und die wichtigsten Grundregeln zum Thema Lüften.

Begriffe, Symbole, Einheiten

Symbol	Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
Φ	Phi	Relative Luftfeuchte	%
$\Phi_{si,cr}$	Phi	Kritische relative Luftfeuchte an raumseitigen Oberflächen	%
f_{Rsi}	F-Faktor	Temperaturfaktor	–
$f_{Rsi,min}$	F-Faktor	Erforderlicher Mindest-Temperaturfaktor	–

3.2.2 Luftfeuchtigkeit und Kondensation

Die Luft, die unsere Erde umgibt, ist ein Gemisch aus verschiedenen Gasen. Zum weitaus größten Teil besteht sie aus Stickstoff und Sauerstoff. Hinzu kommen andere Gase in kleinen und kleinsten Mengen, wie das Edelgas Argon oder Kohlendioxid. Auch Wasserdampf, d. h. gasförmiges Wasser, ist im Gasgemisch unserer Erdatmosphäre enthalten.

Der gesamte Luftdruck, also die Gewichtskraft der Luftsäule über der Erdoberfläche, setzt sich additiv aus den Partialdrücken der einzelnen Luftbestandteile zusammen. Der Partialdruck entspricht dem Druck, den die einzelne Gaskomponente bei alleinigem Vorhandensein ausüben würde. Die Einheit des Luftdrucks ist Pascal, 1 Pa = 1 N/m^2. Meist wird der Luftdruck in Hektopascal angegeben, 1 hPa = 100 Pa.

Luftfeuchtigkeit bezeichnet den Gehalt von Wasserdampf in der Luft. Umgangssprachlich werden unter Wasserdampf meist sichtbare Dampfschwaden, Nebel und Wolken verstanden. Das sind jedoch bereits kondensierte feine Wassertröpfchen, die in der Luft schweben. In Wissenschaft und Technik wird mit Wasserdampf der gasförmige Zustand von Wasser bezeichnet. Gasförmiges Wasser ist unsichtbar.

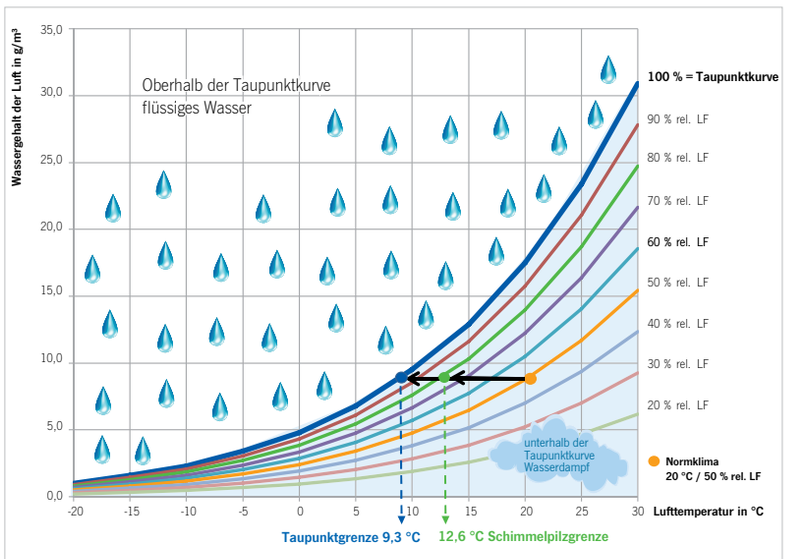
Durch den Vorgang der Kondensation wird Wasserdampf wieder flüssig. Umgekehrt wird flüssiges Wasser durch Verdampfen zu gasförmigem Wasserdampf. Um die flüssige Phase verlassen zu können, brauchen Wassermoleküle ausreichend Energie zur Überwindung der molekularen Kohäsionskräfte und der Oberflächenspannung. Bei höheren Temperaturen schaffen es mehr Teilchen, in die gasförmige Phase zu wechseln, weil die Kohäsionskräfte und die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur abnehmen. Deshalb steigt mit zunehmender Temperatur die Wasserteilchendichte im Gasvolumen. Beim Sättigungsdampfdruck (auch Gleichgewichtsdampfdruck) befinden sich die flüssige und die gasförmige Phase im Gleichgewicht. Der Wert des Sättigungsdampfdrucks ist von der Temperatur abhängig.

Als Maß für die in einem Luftvolumen bei einer bestimmten Temperatur enthaltene Menge an Wasserdampf – d. h. für die absolute Luftfeuchte – wird häufig die Wasserdampfdichte in g/m^3 angegeben. In der Bauphysik wird üblicherweise der Wasserdampf-Partialdruck verwendet.

Trägt man den Maximalwert des Wasserdampfes in g/m^3, den Luft bis zur Sättigung aufnehmen kann (oder den Sättigungsdampfdruck von Wasser) als Kurve über der Temperatur auf, erhält man die Taupunktkurve. Setzt man diese Kurve mit 100 % gleich, lassen sich daraus die Kurven der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur ableiten. Die relative Luftfeuchte Φ, ein Wert in %, gibt an, wieviel der maximal möglichen Wasserdampfmenge bereits in der Luft enthalten sind (bzw. wieviel % des Sättigungsdampfdrucks bei einer bestimmten Temperatur erreicht sind, d. h. das Verhältnis vom Wasserdampfpartialdruck zu Sättigungsdampfdruck).

An den Kurven kann abgelesen werden, wieviel Gramm Wasser bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte und Temperatur in einem Kubikmeter Luft enthalten sind (bzw. welcher Wasserdampfpartialdruck an dieser Stelle erreicht ist). Weil Gramm Wasser pro m³ Luft anschaulicher sind als die Angabe eines Druckes, ist in der nachfolgenden Abbildung die Wasserdampfdichte aufgetragen.

Taupunktdiagramm



Praktische Beispiele für diese Zusammenhänge:

- Wird die Luft in einem Raum durch Stoßlüften gegen kalte Luft ausgetauscht, die dann ohne Zufuhr oder Entnahme von Wasserdampf erwärmt wird, sinkt ihre relative Luftfeuchtigkeit. Bei höherer Temperatur kann sie eine größere maximale Menge Wasserdampf aufnehmen.
- Umgekehrt gilt: Wird im Sommer bei größter Mittagshitze der kühle Keller gelüftet, kühlt die warme Außenluft im kühleren Keller ab und wird dadurch relativ gesehen feuchter. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit über die Taupunktgrenze, schlägt sich Tauwasser im Kellerraum nieder, er wird zunehmend feuchter statt trocken.
- Auch die eiskalte Bierflasche kühlt Raumluft lokal ab, ebenso wie die kalte Brille, wenn man im Winter von draußen hereinkommt. Ohne dass zusätzlich Wasserdampf zugeführt wird, steigt angrenzend an die kalte Stelle die relative Luftfeuchtigkeit rasant an. Wird 100 % relative Luftfeuchtigkeit erreicht, bildet bei weiterer Abkühlung der überschüssige Wasserdampf auf der kalten Oberfläche Tautropfen.

Die Taupunkttemperatur gibt diejenige Temperatur einer Oberfläche an, bei deren Unterschreitung der im angrenzenden Luftvolumen enthaltene Wasserdampf zu kondensieren beginnt und sich auf der Oberfläche Tautropfen bilden bzw. bei saugfähigen Materialen die Durchfeuchtung steigt.

20 °C und 50 % relative Luftfeuchte kennzeichnen das so genannte Normklima, mit dem meistens gerechnet wird. Beim Normklima ist die kritische Oberflächentemperatur für Kondensation (Taupunkttemperatur $T_{DP,}$ (DP = dew point)) 9,3 °C.

Schimmelpilze sind als Sporen überall in der Luft vorhanden. In der freien Natur spielen Schimmelpilze eine wichtige Rolle bei der Zersetzung von organischem Material zu Humus. In Innenräumen auf Wänden und Bauteilen stellen sie jedoch ein erhebliches gesundheitliches Risiko dar. Sie können allergische Reaktionen auslösen, Atemwege und Haut schädigen und diverse Befindlichkeitsstörungen verursachen. Damit die Sporen von Schimmelpilzen auskeimen und weiterwachsen können, benötigen sie ein Substrat sowie über einen gewissen Zeitraum eine relative Luftfeuchte von mindestens 80 %. Bei der Abkühlung von Luft an kalten Oberflächen sind 80 % relative Luftfeuchte logischerweise früher erreicht als 100 %. Das bedeutet, dass die Grenztemperatur für Schimmelpilzwachstum höher liegt als die für Tauwasser. Unter Normklimabedingungen (20/50) ist die Schimmelpilzgrenze bereits bei 12,6 °C erreicht.

Zur Vermeidung von Tauwasser darf an keiner Stelle einer Bauteiloberfläche die relative Luftfeuchte von 100 % erreicht werden. Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung darf an keiner Stelle die relative Luftfeuchte von 80 % erreicht oder überschritten werden. Zur Vermeidung von Baustoffkorrosion kann es weitere Vorgaben für maximal zulässige Oberflächenfeuchten geben.

Kritische relative Luftfeuchten an Bauteiloberflächen:

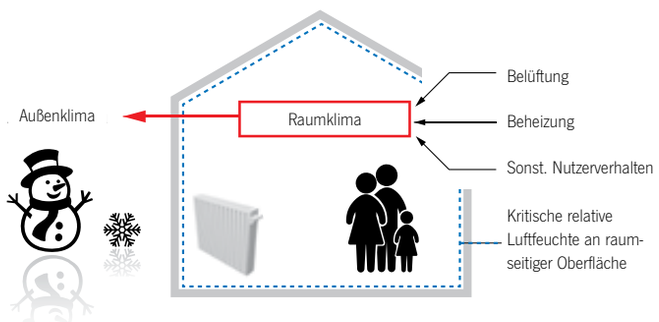
- Für die Bildung von Tauwasser
  $\Phi_{si,cr}$ = 100 % rel. LF
  entspricht bei Normklima 9,3 °C
- Für die Bildung von Schimmel
  $\Phi_{si,cr}$ = 80 % rel. LF
  entspricht bei Normklima 12,6 °C

Weicht ein individuelles Klima vom Normklima ab, gelten zwar immer noch die Vorgaben für kritische Luftfeuchten an Bauteiloberflächen. Es ergeben sich jedoch andere Werte für die kritischen minimal zulässigen Oberflächentemperaturen. Bei individuellen Raumklimabedingungen kann die kritische Mindesttemperatur einer raumseitigen Oberfläche $T_{si,min}$ entweder im Einzelfall berechnet oder näherungsweise mit Hilfe der Tabellen A.1 und A.2 der DIN 4108-3 bestimmt werden. Für ein individuelles Raumklima mit z. B. 60 % relativer Luftfeuchte und 21 °C Raumtemperatur erhöht sich die Schimmelpilzgrenze auf 16,5 °C, und die Taupunkttemperatur beträgt 13 °C.

Programm zur Berechnung des Tau-/Schimmelpunktes:
www.sanco.de/service/sanco-taupunktrechner

Das individuelle Raumklima wird durch die Belüftung und die Beheizung des Raumes bestimmt. Auch sonstiges Nutzerverhalten spielt eine Rolle, z. B. wie viele Personen in den Räumen sind, Zimmerpflanzen, die Art der Möblierung, Kochen, Wäschetrocknen in den Wohnräumen usw. Das Außenklima ergibt zusammen mit dem Raumklima die Klimarandbedingung.

Thermische Gebäudehülle



Aus den Vorgaben für die einzuhaltenden kritischen relativen Luftfeuchten $\Phi_{si,cr}$ ergeben sich die notwendigen Mindesttemperaturen für die raumseitigen Oberflächen. Zusammen mit den Klimarandbedingungen folgt daraus der erforderliche Mindestwärmeschutz für die thermische Gebäudehülle. Für weitergehende Informationen siehe SANCO AWT Info „Kondensation bei Isolierglas“.

3.2.3 Der Temperaturfaktor f

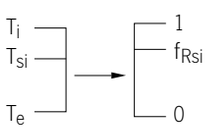
Von der warmen Raumluft bis hin zur kalten Temperatur der Außenluft entsteht in der Außenhülle von beheizten Gebäuden ein Temperaturgefälle. Dabei ist die Oberflächentemperatur auf der Außenseite z. B. eines Fensters höher als die Außenlufttemperatur. Umgekehrt ist die Temperatur auf der raumseitigen Oberfläche niedriger als diejenige der Raumluft. Ein gut dämmendes Bauteil hat raumseitig eine hohe, nahe bei der Raumluft liegende Oberflächentemperatur. Bei schlechter Dämmung ist die Oberflächentemperatur durch den großen Wärmeverlust nach draußen schon deutlich abgesunken. Abgesehen davon, dass die verloren gehende Wärme mit hohen Energiekosten ständig nachproduziert werden muss, ist so ein schlecht dämmendes Bauteil auch von Nachteil für Komfort und Hygiene: Man hält sich nicht gerne in der Nähe von kalten Oberflächen auf, da sie Zugluftempfinden hervorrufen. Und auf kalten Oberflächen kann sich Tauwasser aus der Luft niederschlagen, das auf Dauer zu Schimmel führt. Schimmel kann auf Oberflächen bereits ab einer relativen Luftfeuchte von 80 % wachsen.

Die Fähigkeit eines Bauteils zur Wärmedämmung wird durch den U-Wert beschrieben. Will man jedoch den Feuchteschutz beurteilen, reicht der U-Wert alleine nicht aus, weil er als gemittelter Wert über die gesamte Bauteilfläche nichts über lokale Störstellen aussagt. Hierfür wird die Aussage benötigt, welche tiefste Temperatur raumseitig an welcher Stelle eines Bauteils erreicht wird.

Die zweidimensionale Berechnung eines Fensterquerschnitts nach DIN ISO EN 10077-2 liefert als Ergebnis neben dem Wärmestrom auch den Temperaturverlauf. Am Rahmen und an der Glaskante lassen sich die Oberflächentemperaturen ablesen, die sich unter den vorgegebenen Rechenbedingungen (raumseitig 20 °C, außenseitig 0 °C) ergeben. Bei Fenstern findet sich die tiefste raumseitige Oberflächentemperatur $T_{si,min}$ in der Regel im Bereich der Wärmebrücke am Glasrand.
Im Praxisfall ist der Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur nicht nur von den Dämmqualitäten des Bauteils abhängig, sondern auch von den jeweiligen Randbedingungen für Raumluft- und Außentemperatur. Je kälter es draußen ist, umso tiefer sinkt die raumseitige Oberflächentemperatur. Damit nicht jeder Fall neu berechnet werden muss, wurde der dimensionslose Temperaturfaktor geschaffen.

Der Temperaturfaktor f_{Rsi} setzt den Abstand zwischen niedrigster Oberflächentemperatur und Außentemperatur zur gesamten Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft ins Verhältnis. Wurde gemäß DIN EN ISO 10077-2 bei T_i = 20 °C und T_e = 0 °C mit zweidimensionaler Wärmestromberechnung eine niedrigste Oberflächentemperatur von 14 °C ermittelt, errechnet sich daraus der Temperaturfaktor 0,7, d. h. von der gesamten Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur sind an der raumseitigen Oberfläche noch 70 % bis zum Erreichen der Außentemperatur vorhanden.

Mit diesem einmal ermittelten f-Faktor eines Bauteils kann nun die niedrigste Oberflächentemperatur für jede andere Raum- und Außentemperatur ausgerechnet werden.



$$f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e}$$

$$T_{si,min} = T_e + f_{Rsi}\,(T_i - T_e)$$

Ist die Außentemperatur niedriger, sinkt die Oberflächentemperatur ab, bis wieder das gleiche Verhältnis erreicht ist. Beispiel: Raumtemperatur T_i = 20 °C und Außentemperatur T_e = -10 °C ergibt eine Differenz T_i – T_e = 30 °C. Multipliziert mit dem f-Faktor 0,7 bzw. 70 % => 0,7 (20 – (-10)) = 21 °C als verbleibende Temperaturdifferenz von Bauteiloberfläche bis Außentemperatur. Daraus resultiert als Wert für die Oberflächentemperatur $T_{si,min}$ = -10 °C + 21 °C = 11 °C.

Im Weiteren kann mit Hilfe des f-Faktors das Tauwasser-Risiko beurteilt werden. Sinkt die Temperatur einer Oberfläche unter die Taupunkt-Temperatur (T_{DP}) der sie umgebenden Luft, bildet sich an dieser Stelle Tauwasser. Jeder hat schon einmal an Fenstern bei tiefen Außentemperaturen Kondensat entlang der raumseitigen Glaskante beobachtet – insbesondere, wenn herkömmliche Aluminium-Abstandhalter verwendet wurden.

f_{Rsi}	Temperaturfaktor
T_i	Innentemperatur – internal
T_e	Außentemperatur – external
$T_{si,min}$	Minimale Oberflächentemperatur innen – surface internal

Für ein Normklima gilt: Bei 20 °C Temperatur und 50 % relative Raumluftfeuchte beträgt die Taupunkttemperatur T_{DP} = 9,3 °C. Ist die minimale Oberflächentemperatur $T_{si,min}$ höher, ist kein Kondensat zu erwarten. Schimmelbildung beginnt jedoch nicht erst bei Tauwasserausfall, sondern bereits bei ca. 80 % rel. Luftfeuchte, was bereits bei einer Temperatur von 12,6 °C erreicht wird (siehe Kapitel 3.2.2). Aus diesen beiden Grenztemperaturen errechnen sich gemäß DIN 4108-3 für die standardisierte Klimarandbedingung von -5 °C außen und +20 °C auf der Raumseite folgende f-Faktoren als Grenzwerte für die raumseitige Oberfläche:

Erforderliche Mindest-Temperaturfaktoren gemäß DIN 4108-3:

- Zur Vermeidung von Tauwasserbildung $f_{Rsi,min}$ = 0,57
- Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung $f_{Rsi,min}$ = 0,70

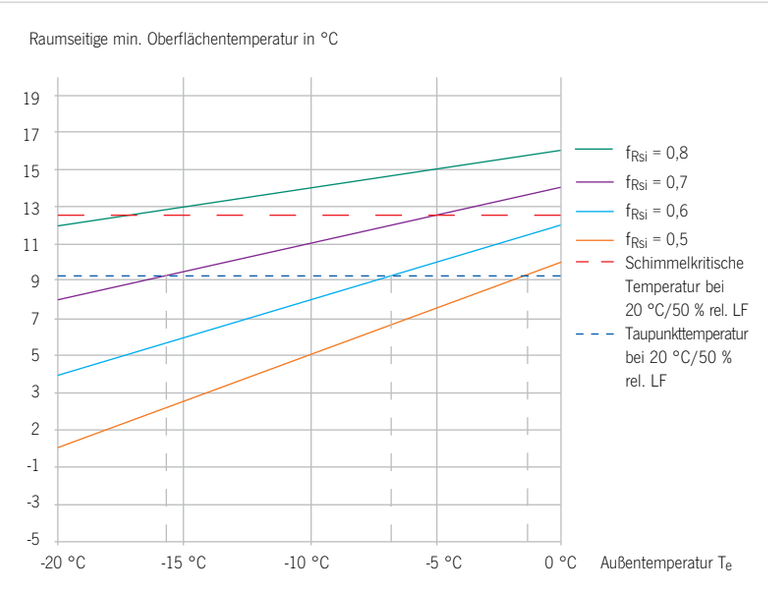
Allerdings sind nach DIN EN ISO 13788 Fenster und Pfosten-Riegel-Konstruktionen von dieser Regel ausgenommen: an ihnen ist Tauwasserbildung vorübergehend und in kleinen Mengen zulässig, falls die Oberfläche die Feuchtigkeit nicht absorbiert und entsprechende Vorkehrungen zur Vermeidung eines Kontaktes mit angrenzenden empfindlichen Materialien getroffen werden.

Mit warmer Kante und Dreifach-Isolierglas im Fenster wird der Temperaturfaktor 0,7 jedoch in den meisten Fällen erreicht oder sogar übertroffen.

Formt man die Gleichung um, kann die niedrigste Außentemperatur errechnet werden, bei der bei Normklima auf der Oberfläche mit einem gegebenen f-Faktor gerade noch kein Tauwasser auftritt, d. h. die Taupunkttemperatur T_{DP} = 9,3 °C erreicht wird (bzw. 12,5 °C als schimmelkritische Temperatur):

$$T_e = \frac{f_{Rsi} \cdot T_i - T_{si,min}}{f_{Rsi} - 1}$$

Ablesung der kritischen Außentemperatur $T_{e,krit}$, unterhalb der bei Normklima (20 °C und 50 % rel. LF) Tauwasser auftreten kann



	$T_{e,krit}$ Schimmel	$T_{e,krit}$ Tauwasser
f_{Rsi} = 0,8	-17,5 °C	-33,5 °C
f_{Rsi} = 0,7	-5,0 °C	-15,7 °C
f_{Rsi} = 0,6	1,3 °C	-6,8 °C
f_{Rsi} = 0,5	5,0 °C	-1,4 °C

Für andere Klima-Randbedingungen muss zuerst anhand der vorhandenen Raumluftfeuchte und Raumtemperatur die Taupunkttemperatur bestimmt werden. Mit dem f-Faktor wird die minimale Oberflächentemperatur $T_{si,min}$ der vorgegebenen Randbedingungen berechnet. Aus dem Vergleich von T_{DP} mit $T_{si,min}$ ergibt sich, ob die Stelle niedrigster Oberflächentemperatur am Fenster bei einer bestimmten Außentemperatur tauwasserfrei ist oder nicht.

3.2.4 Raumklima und thermische Behaglichkeit

Je nach Außenklimabelastung und Raumklimavorgaben ergeben sich ganz unterschiedliche Anforderungen an die Ausführung von Gebäudehüllen. Ziel des klimagerechten Bauens ist es, durch eine optimale Gebäudeauslegung über eine möglichst lange Zeit im Jahresverlauf ganz ohne Energieaufwand für Heizen oder Kühlen ein angenehmes Raumklima zu halten. Dort, wo zeitweilig geheizt oder gekühlt werden muss, soll dies möglichst effizient geschehen und das Gebäude im Winter gegen Wärmeverluste und im Sommer gegen übermäßige Energiezufuhr geschützt werden.

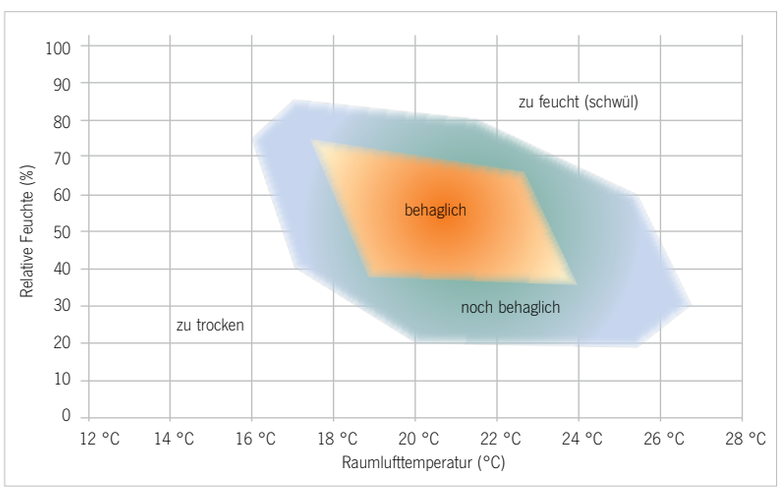
Thermische Behaglichkeit bedeutet für Nutzer und Bewohner von Gebäuden, dass sie mit ihrem Umgebungsklima zufrieden sind.

Die thermische Behaglichkeit in Gebäuden wird von vielen Faktoren beeinflusst:

- **Raumklima:** Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung, Luftqualität, Licht, Oberflächentemperaturen, Strahlungsaustausch, Schall-/Lärmpegel
- **Nutzer:** Bekleidung, Aktivitätspegel, sonstiges Verhalten
- **Außenklima:** Außentemperatur, Niederschlag, Wind, Geräuschquellen

Da die Behaglichkeit individuell unterschiedlich empfunden wird, werden Bereiche angegeben, in denen die meisten Menschen mit dem Raumklima zufrieden sind.
Die überlagerten Behaglichkeitsbereiche für Lufttemperatur und Luftfeuchte, die eng zusammenwirken, lassen sich in Diagrammen als Behaglichkeitsfeld darstellen.

Behaglichkeitsfeld: Raumluftfeuchte – Raumtemperatur



Die gefühlte Temperatur (Empfindungstemperatur) entsteht aus der kombinierten Wirkung von Raumlufttemperatur und den Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen. Sind die Wände kalt, muss dies durch hohe Raumlufttemperaturen kompensiert werden. Umgekehrt können warme Wände in bestimmten Grenzen eine niedrigere Raumlufttemperatur ausgleichen.

Temperaturdifferenz zwischen Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur der raumseitigen Scheibe bedeutet

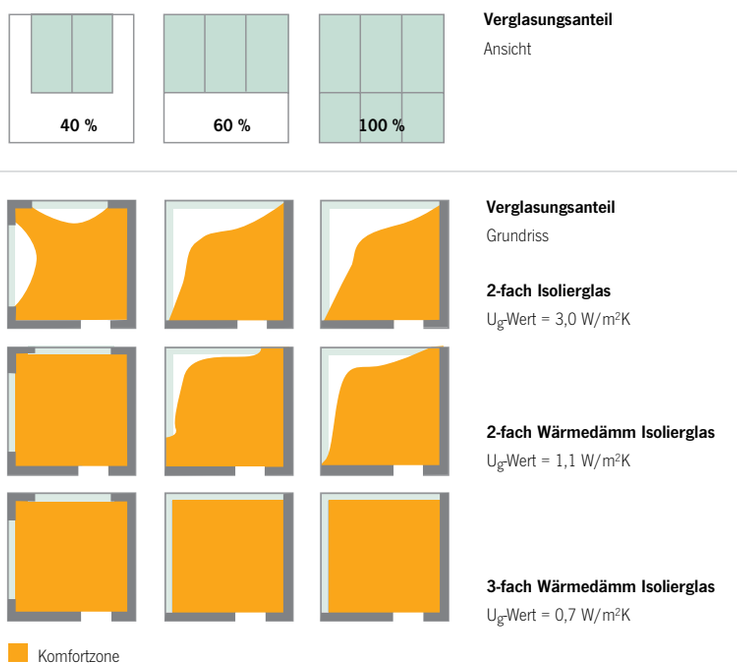
0 bis 5 °C	■ Höchster Wohnkomfort, auch in unmittelbarer Fensternähe ■ Kein unangenehmes Zugluftempfinden in Fensternähe ■ Schwitzwasser und Vereisungen auf der raumseitigen Scheibe nur in Ausnahmefällen möglich ■ Geringer Fremdwärmebedarf (Energieeinsparung)
5 bis 10 °C	■ Mittlerer bis guter Wohnkomfort ■ Leichtes Zugluftempfinden in unmittelbarer Fensternähe möglich ■ Schwitzwasser und Vereisungen auf der raumseitigen Scheibe sind bei Außentemperaturen weit unter dem Gefrierpunkt möglich ■ Mittlerer Fremdwärmebedarf
über 10 °C	■ Verminderter Wohnkomfort ■ Zugluftempfinden in Fensternähe ■ Schwitzwasser und Vereisungen auf der raumseitigen Scheibe sind bereits bei Temperaturen leicht unter dem Gefrierpunkt möglich ■ Großer Fremdwärmebedarf

Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Raumhüllflächen, desto unbehaglicher fühlen sich die Bewohner. Hochwärmedämmende Dreifach-Isoliergläser mit ihren nahe an der Raumlufttemperatur gelegenen Oberflächentemperaturen auf der Raumseite sorgen für besten Wohnkomfort. So ist auch in großzügig verglasten Räumen im Winter an jeder Stelle ein angenehmer Aufenthalt möglich.

Oberflächentemperatur der raumseitigen Scheibe bei 20 °C Raumtemperatur, in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Verglasungsart	U_g-Wert	Außenlufttemperatur			
		0 °C	- 5 °C	- 11 °C	- 14 °C
Einfachglas	5,8 W/m²K	+ 6 °C	+ 2 °C	- 2 °C	- 4 °C
2-fach Isolierglas	3,0 W/m²K	+ 12 °C	+ 11 °C	+ 8 °C	+ 7 °C
2-fach Wärmedämm Isolierglas	1,1 W/m²K	+ 17 °C	+ 16 °C	+ 15 °C	+ 15 °C
3-fach Wärmedämm Isolierglas	0,7 W/m²K	+ 18 °C	+ 18 °C	+ 17 °C	+ 17 °C

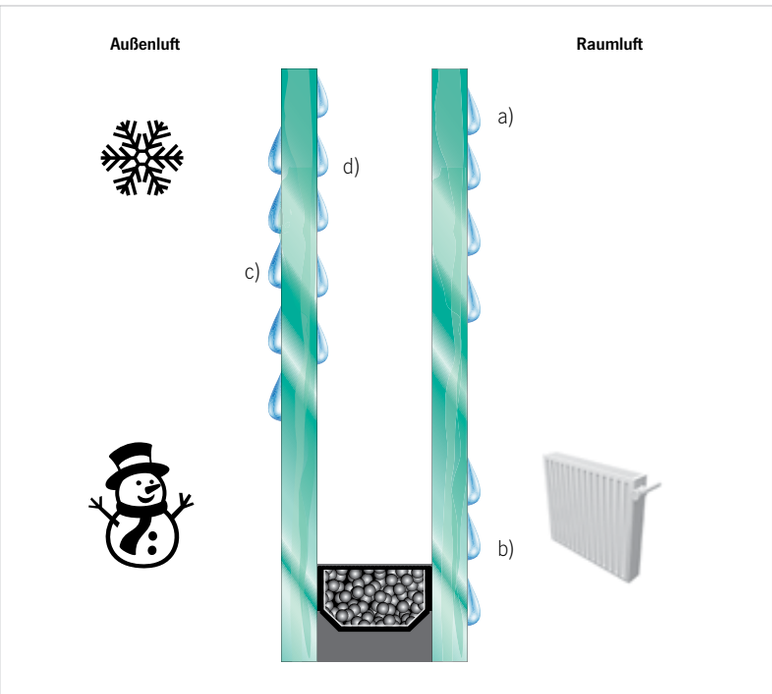
Behaglichkeit und Raumnutzung



3.2.5 Tauwasser und Glas

Bei einfach verglasten Fenstern war die winterliche Kondensatbildung auf der ganzen raumseitigen Glasfläche eine bekannte Erscheinung. War es draußen kalt genug, bildeten sich Eisblumen. Erst die Erfindung von Isolierglas mit einem hermetisch abgeschlossenen, allzeit trockenen Scheibenzwischenraum konnte dies verhindern.

Bildet sich bei Isolierglas Kondensat, muss zunächst geklärt werden, wo dies passiert: raumseitig, im Scheibenzwischenraum oder auf der Außenseite. Für das Verständnis der Vorgänge ist Wissen um die physikalischen Grundlagen aus den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels erforderlich.



Kondensat kann auftreten
a) auf der raumseitigen Oberfläche der Innenscheibe
b) an der Glaskante der Innenscheibe
c) auf der Außenoberfläche der Außenscheibe
d) im Scheibenzwischenraum

Fall a)
Auf der raumseitigen Glasoberfläche kommt bei modernen Isoliergläsern, insbesondere bei Dreifach-Wärmedämmgläsern praktisch kein Tauwasser mehr vor. Die Oberflächentemperaturen in der ungestörten Scheibenmitte sind so hoch, dass nur noch in ganz extremen Fällen bei sehr hohen Raumluftfeuchten in Kombination mit sehr niedrigen Außentemperaturen Tauwasser entstehen könnte.

Fall b)
Der Randverbund einer Isolierglasscheibe stellt mit Abstandhalter und Sekundärdichtstoff eine leitende Verbindung dar und ist eine wärmetechnische Schwachstelle, insbesondere wenn konventionelle Abstandhalter aus Aluminium oder Stahl verwendet wurden. Deswegen kann es an der raumseitigen Glaskante bei höheren Raumluftfeuchten schon eher zu Tauwasserbildung kommen. Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter haben durch die Minimierung der Wärmebrücke einen sehr viel größeren tauwasserfreien Bereich. Aber auch hierfür gibt es bei sehr ungünstigen Randbedingungen Grenzen. Ebenso wie für Fall a) gilt: Ist der f-Faktor der Konstruktion bekannt, lässt sich berechnen, bei welcher Außenlufttemperatur für die gegebene Raumlufttemperatur Kondensation beginnt. Raumseitige Kondensation auf Glasflächen oder an der Glaskante kann jedoch auch andere Gründe haben: Fenster müssen heute luftdicht eingebaut werden. Ohne vernünftige Lüftungskonzepte führen luftdichte Gebäude rasch zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchten und damit früher zu Tauwasser. Auch konstruktive Fehler bei der Planung können eine Tauwasserproblematik noch verschärfen.

Fall c)
Kondensat auf der Außenseite einer Isolierglasscheibe ist der physikalische Beweis für ihre gute Dämmleistung – auch wenn das Tauwasser an dieser Stelle stört, weil es die freie Durchsicht behindert. Es ist dann übrigens auch auf der Außenwand vorhanden, nur dort ist es nicht so sichtbar. Der Grund liegt darin, dass die unverschattete Außenscheibe und die Außenwände an den klaren Nachthimmel Wärmestrahlung aussenden und wegen ihrer guten Dämmung aus dem Gebäudeinnern nicht „nachgeheizt“ werden. Dadurch kann ihre Oberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur der Außenluft sinken. Schräg eingebaute Verglasungen wie Dachflächenfenster sind von dem Effekt stärker betroffen als senkrechte Scheiben, ähnlich wie bei einem Auto die Frontscheibe. Will man die Scheiben nicht durch Fensterläden verschatten, kann eine Außenbeschichtung helfen, weil dies die Abstrahlung verhindert.

Fall d)
Im Scheibenzwischenraum eines fabrikneuen Isolierglases herrscht absolute Trockenheit, mit einer Taupunkttemperatur von kleiner als -60 °C. Tauwasser ist also praktisch nicht möglich. Bildet sich bei Isolierglas dennoch Tauwasser im Scheibenzwischenraum, ist es kaputt. Der Randverbund ist nicht mehr dicht und das Trockenmittel ist gesättigt. Die Scheibe kann nicht mehr repariert werden.

Siehe auch SANCO AWT Info „Kondensation bei Isolierglas“

3.2.6 Lüftung

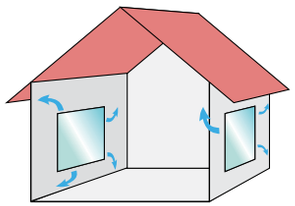
Richtiges Lüften reduziert die Gefahr von Feuchteschäden in Gebäuden und beugt damit gesundheitlichen und bauphysikalischen Problemen vor.

Auf Grund höherer energetischer Anforderungen werden die Gebäudehüllen heute dicht ausgeführt. Die Lüftung durch Leckagen ist nicht mehr vorhanden. Deshalb gewinnt die kontrollierte und bewusste Lüftung immer mehr an Bedeutung. Ein Lüftungskonzept muss den Luftwechsel unter Berücksichtigung möglichst geringer Energieverluste durch andere Maßnahmen sicherstellen. Die Norm DIN 1946-6 legt fest, ob lüftungstechnische Maßnahmen notwendig sind und beschreibt, wie ein Lüftungskonzept bestimmt werden muss. Sie stellt konkrete Anforderungen an den Mindestluftwechsel zur Sicherstellung einer nutzerunabhängigen Lüftung. Die Verantwortung dafür liegt beim Planer, also beim Architekten, beim ausführenden Unternehmer oder Handwerker.

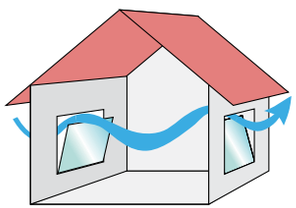
Lüftungskonzepte lassen sich insbesondere im Bereich der Altbausanierung gut mit dezentralen, ins Fenster integrierten Lüftungssystemen umsetzen (Luftdurchlässe bzw. Überströmöffnungen, Fensterbanklüfter, Aufsatzelemente, Fensterfalzlüfter, beschlagsgeregelte Lüfter, ventilatorbetriebene Lüftungsgeräte, mit oder ohne Wärmerückgewinnung, manuell, automatisch oder sensorisch geregelt).

Natürlich sollte auch der Nutzer dafür sorgen, dass zum Abführen von Feuchte, Geruchs- und Schadstoffen nach draußen und Versorgung mit Frischluft regelmäßig gelüftet wird. Am besten geschieht dies durch Stoß- oder Querlüftung. Dabei wird die warme, feuchte Raumluft ohne Auskühlen der Raumumhüllung und der darin enthaltenen Gegenstände rasch und komplett gegen kalte Luft getauscht. In einem Gebäude ohne Lüftungsanlage ist regelmäßiges Lüften unabdingbar.

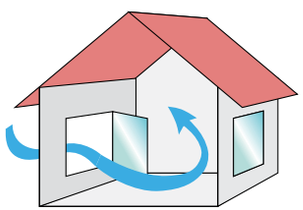
Zwangsentlüftung
Baumängel wie undichte Fenster, Türen und Wandabschlüsse führten früher zu einer unkontrollierten Zwangsentlüftung, hohe Energieverluste waren die Folge.



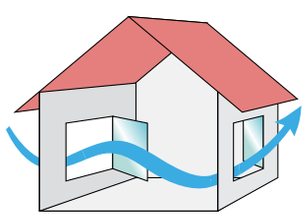
Dauerlüftung
Bei Spaltlüftungen – z. B. Fenstern, die dauernd in Kippstellung stehen – wird Energie vergeudet, Luft nicht komplett ausgetauscht. Möbel und Wände werden extremen Temperaturwechseln ausgesetzt.



Stoßlüftung
Die wesentlich effektivere Art die Raumluft auszutauschen. Der Fensterflügel wird dabei komplett geöffnet und die Luft innerhalb von ca. 10 Minuten ausgetauscht. Dadurch, dass der Luftaustausch sehr schnell stattfindet, tritt keine Auskühlung der Bauteile auf.



Querlüftung
Zehn Minuten Querlüftung durch zwei gegenüberliegende, offene Fenster ist die beste Art des Lüftens. Die gesamte Raumluft wird ausgetauscht, die gespeicherte Wärme in den Wänden und Böden heizt die frische Luft ohne große Verluste schnell wieder auf.



3.3 SONNE UND LICHT

3.3.1 Einleitung

Die Sonne liefert kostenlos mehr Energie auf die Erdoberfläche, als die Menschheit jemals verbrauchen kann. In nur einer Stunde schickt sie uns einen Energiebetrag, der dem Jahresbedarf der gesamten Weltbevölkerung entspricht. Nur etwa 0,1 % davon werden durch Photosynthese in Form von Biomasse in Pflanzen gespeichert. Sonnenlicht ist essentiell für die Gesundheit des Menschen. Im Winter trägt die Sonne mit ihrer Einstrahlung über transparente Fenster- und Fassadenflächen zur Raumheizung bei.

Nicht zuletzt durch die immer größeren Glasflächenanteile der modernen Architektur ist jedoch die sommerliche Überhitzung von Gebäuden auch in unseren Breitengraden zum Thema geworden. Zu hohe Raumtemperaturen bringen uns aus der Komfortzone, in zu warmen Büroräumen lässt die Leistungsfähigkeit rapide nach. Während der sommerlichen Hitzeperioden laufen in Fahrzeugen, Objektbauten und zunehmend auch in privaten Gebäuden die Klimaanlagen auf Hochtouren. Die hohen Energieverbräuche der Klimaanlagen bei vergleichsweise schlechten Wirkungsgraden befeuern den Klimawandel weiter. Dieser wiederum ist Ursache für immer häufigere Hitzeperioden im Sommer und zunehmend heftigere Wetterereignisse – ein Teufelskreis. Da die Sonne tagsüber auch für kostenlose Beleuchtung sorgt, darf sie zum Schutz vor Überhitzung nicht einfach ausgeblendet werden. Sonst wäre tagsüber künstliche Beleuchtung notwendig, was ebenfalls aus Gründen der Energieeffizienz unerwünscht ist.

Klimagerechtes Bauen erfordert deshalb Kenntnis der Wechselwirkungen von Sonneneinstrahlung und Glas. Mit ihrer selektiven Verschattung leisten Sonnenschutzgläser einen wichtigen Beitrag zum sommerlichen Wärmeschutz.

Dieses Kapitel behandelt die strahlungstechnischen Grundlagen zu den Themen Sonnenschutz und sommerlicher Wärmeschutz und erläutert die wichtigsten sonnenschutztechnischen Kenngrößen.

Begriffe, Symbole, Einheiten

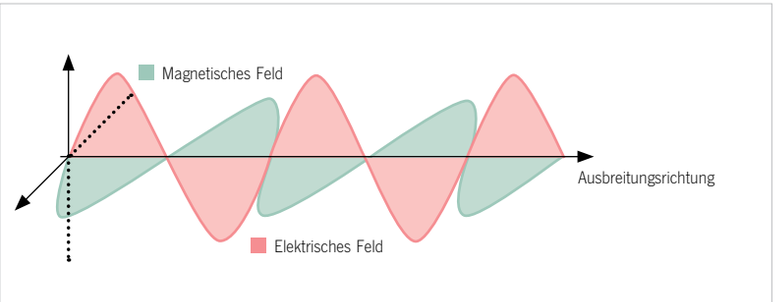
Symbol	Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
λ	Lambda*	Wellenlänge	m
f		Frequenz	Hz bzw. 1/s
ρ	Rho	Reflexionsgrad	–
α	Alpha	Absorptionsgrad	–
τ	Tau	Transmissionsgrad	–
q_a, q_i		Sekundäre Wärmeabgabe nach außen/innen	%

*Der griechische Buchstabe Lambda wird sowohl für die Wärmeleitfähigkeit als auch für die Wellenlänge als Symbol verwendet.

3.3.2 Sonnenspektrum und elektromagnetische Strahlung

Elektromagnetische Wellen sind sich ausbreitende Schwingungen von elektrischen und magnetischen Feldern, die Schwingung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwellen*). Zu ihrer Fortbewegung benötigen elektromagnetische Wellen kein Medium, sie durchdringen auch ein Vakuum.

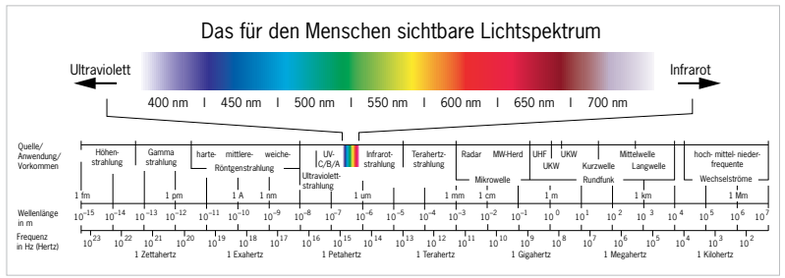
Darstellung einer elektromagnetischen Welle



Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung wird nach Wellenlängen unterteilt. Das sichtbare Licht umfasst dabei nur einen winzigen Bereich aus dem Gesamtspektrum. Für den Rest des elektromagnetischen Spektrums ist das menschliche Auge blind, zu seiner Erforschung benötigt der Mensch Sensoren und Hilfsmittel.

*) Anmerkung: Im Gegensatz zur transversal (quer) schwingenden elektromagnetischen Strahlung schwingt Schall in Luft längs, in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwelle). Außerdem benötigen Schallwellen zur Ausbreitung ein Medium (siehe Kapitel 3.4 Schall).

Das elektromagnetische Spektrum, unterteilt nach Wellenlängenbereichen



Infrarot-Strahlung (IR) ist für den Menschen unsichtbar. Ihr Wellenlängenbereich geht von 780 nm (nahes Infrarot) bis 0,1 mm (fernes Infrarot). IR-Strahlung durchdringt Dunst und Nebel besser als sichtbares Licht. Deshalb kann man mit infrarotempfindlichen Filmen auch dann fotografieren, wenn „die Sicht fehlt“. Thermografie-Aufnahmen mit einer Infrarotkamera machen Wärmeverluste an Gebäuden sichtbar.

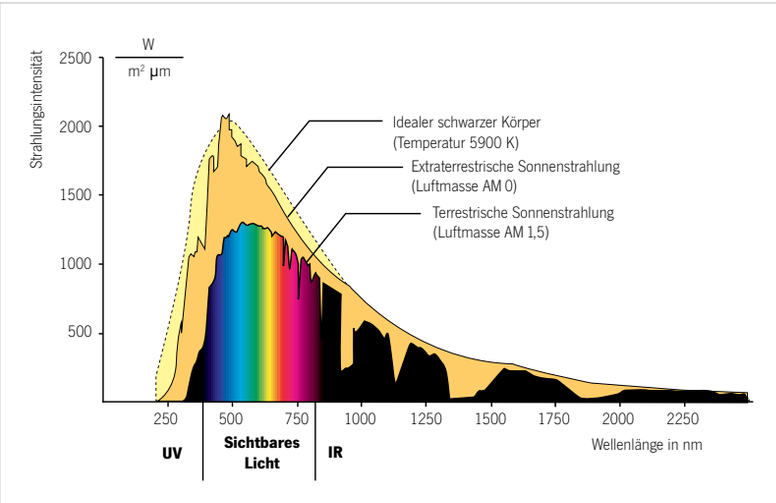
Licht bezeichnet den für Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen ca. 380 und 780 nm. Die Farbe wird von der Wellenlänge bestimmt. Die Grenzen zu IR und UV sind nicht scharf, die Empfindlichkeit des menschlichen Auges nimmt im Randbereich allmählich ab.

Der Mensch kann im Bereich der ultravioletten Strahlung (UV) nicht sehen, aber einige Tiere, insbesondere Insekten, sehen auch im UV-Bereich. Manche für uns unscheinbare weiße Blüten sind für Insekten sehr attraktiv. UV-Strahlung ist kurzwelliger und energiegeladener als Licht. Der Wellenlängenbereich geht von 380 bis 1 nm und wird in UV-A, der direkt an den sichtbaren Bereich angrenzt, UV-B und UV-C unterteilt. Strahlung unterhalb 200 nm, wie die Röntgen- und die Gammastrahlung, ist so energiegeladen, dass sie Elektronen aus Atomen oder Molekülen lösen kann. Sie ist ionisierend und deshalb für den Menschen und andere Organismen gefährlich. Glücklicherweise schirmt die Erdatmosphäre alle Sonnenstrahlung unterhalb von 300 nm Wellenlänge ab.

Das Spektrum der auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlung reicht von UV über sichtbar bis zum mittleren Infrarot, von ca. 300 bis 2500 nm. Dabei wird das komplette Strahlungsangebot der Sonne auf dem Weg durch die Erdatmosphäre durch Absorption und Streuung reduziert. Es muss deshalb zwischen der extraterrestrischen Sonnenstrahlung (außerhalb der Erdatmosphäre) und der Einstrahlung an der Erdoberfläche unterschieden werden.

Die Strahlungsleistung, die auf die Erdoberfläche auftrifft, ist vor allem vom Sonnenstand abhängig, d. h. von der Jahreszeit und der Tageszeit. An klaren Sommertagen erreichen die Sonnenstrahlen in Deutschland um die Mittagszeit eine Strahlungsleistung von bis zu 1000 W/m². Um die Zeit der Wintersonnwende Ende Dezember beträgt die Strahlungsleistung bei trübem Wetter nur etwa ein Fünftel davon.

Intensität der Sonnenstrahlung im erdnahen Weltraum und an der Erdoberfläche im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers* bei einer Temperatur von 5900 K



(Quelle: Wikimedia Commons)

*) Anmerkung: Der ideale Wärmestrahler ist der theoretische „schwarze Körper". Er absorbiert und emittiert die maximal mögliche Strahlung, sein Emissionsvermögen beträgt 1. Bei typischen Umgebungstemperaturen liegt das Maximum seiner Abstrahlung im langwelligen Infrarotbereich (fernes Infrarot). Deshalb wird Wärmestrahlung umgangssprachlich mit Infrarotstrahlung gleichgesetzt. Je wärmer der Körper ist, umso mehr verschiebt sich sein Maximum jedoch in Richtung sichtbares Licht.

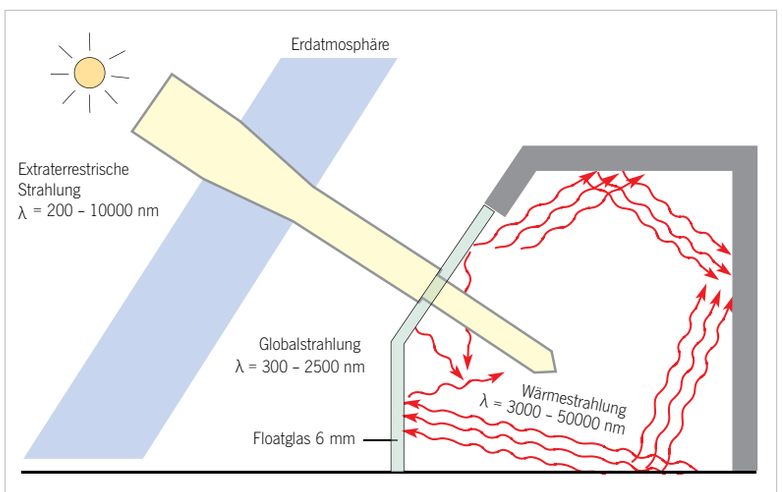
Zur Gesamtstrahlungsleistung der Sonne an der Erdoberfläche (Meereshöhe) trägt das sichtbare Licht ca. 52 % bei, die Infrarotstrahlung ca. 42 %, wobei nur noch 1 % der Gesamtstrahlung im fernen Infrarot größer 2500 nm liegt. Die UV-Strahlung liefert mit ca. 6 % zwar einen vergleichsweise kleinen Anteil, ist aber insbesondere mit dem UV-B-Anteil an der Haut sehr wirksam und kann Sonnenbrand erzeugen. Der UV-A-Anteil schädigt tiefere Hautschichten, er verursacht Hautalterung und Faltenbildung.

Das menschliche Auge ist genau in dem Bereich am empfindlichsten, in dem die größte Strahlungsintensität der Sonne auf der Erdoberfläche auftrifft.

3.3.3 Strahlung und Glas

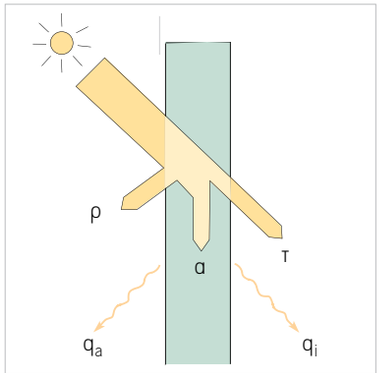
Es kann als „glückliche Fügung" bezeichnet werden, dass sich der gesamte Wellenlängenbereich der Sonnenstrahlung größtenteils mit dem Durchlässigkeitsbereich von Glas deckt. Wie sich Sonnenstrahlung beim Auftreffen auf Glas verhält, ist allerdings von der Wellenlänge abhängig. Vor allem am kurzwelligen Ende des Spektrums wird die Durchlässigkeit von der Glasart bestimmt.

Die für Bau und Automotive überwiegend verwendeten Kalk-Natron-Silikatgläser sind sowohl für Wellenlängen kleiner 320 nm als auch im mittleren bis fernen Infrarotbereich größer ca. 2500 nm nicht durchlässig. Diese wellenlängenabhängige Durchlässigkeit von Glas ist verantwortlich für den Treibhauseffekt: Die Sonnenenergie, die auf der Erdoberfläche ankommt, gelangt durch unbeschichtetes Glas zum größten Teil hindurch ins Rauminnere. Wände, Böden und Einrichtungsgegenstände im Raum werden durch Absorbieren der Strahlung erwärmt. Sie senden die aufgenommene Energie als Wärmestrahlung wieder aus (Emission). Bei „normalen" Temperaturen liegt das Maximum dieser Wärmestrahlung im fernen Infrarot. Dafür ist Glas aber nicht durchlässig, die Wärmestrahlung wird absorbiert bzw. in den Raum zurückreflektiert. Die Energie bleibt im Innern, der Raum wird deshalb zunehmend wärmer.



Der Effekt wird deshalb Treibhauseffekt genannt, weil er im Gartenbau in Gewächshäusern genutzt wird: Die durch ein Glashaus einfallende Sonne erwärmt den dunklen Boden. Die vom Boden emittierte Wärmestrahlung kommt durch das Glas nicht mehr hinaus, erwärmt die Luft und fördert so das Pflanzenwachstum, wenn es draußen dafür noch zu kalt wäre.

Trifft Sonnenstrahlung auf eine transparente Glasoberfläche, wird ein Teil der einfallenden Strahlung zurückgeworfen (Reflexion), ein Teil von der Materie aufgenommen (Absorption) und ein Teil geht hindurch (Transmission). Das gilt für das sichtbare Licht ebenso wie für das gesamte eingestrahlte Sonnenspektrum. Allerdings sind die jeweiligen Anteile in den Spektralbereichen nicht immer gleich groß. Da Energie nicht verlorengehen kann, muss die Summe aller reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlung immer gleich der Einstrahlung bleiben.



Reflexionsgrad ρ, Absorptionsgrad α und Transmissionsgrad τ ergeben zusammen immer 1.

Der natürliche Treibhauseffekt der Erde entsteht dadurch, dass die Treibhausgase der Erdatmosphäre die von der Sonne kommende Strahlung weitestgehend durchlassen, aber die von der Erde ausgesandte Wärmestrahlung zum großen Teil absorbieren. Ohne diesen Effekt wäre es auf der Erde ziemlich kalt. Die wichtigsten Treibhausgase der Erdatmosphäre sind Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas). Durch menschlichen Einfluss ist der Anteil dieser Gase in der Erdatmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution enorm schnell gestiegen. Dies lässt die globalen Durchschnittstemperaturen stetig ansteigen. Dabei sind die durch Landwirtschaft und Viehhaltung entstehenden Gase Methan und Lachgas für diesen menschengemachten Treibhauseffekt noch um ein Vielfaches wirksamer als das durch die Nutzung fossiler Brennstoffe und die Rodung von Urwäldern freigesetzte CO_2.

Wie in Kapitel 3.3.2 zum schwarzen Körper angemerkt, senden Gegenstände, die Strahlung absorbieren, selbst wieder Wärmestrahlung aus (Emission). Glasscheiben strahlen die absorbierte Sonnenenergie als so genannte sekundäre Wärmeabgabe zur Raumseite (q_i, i = innen) und nach draußen (q_a, a = außen) wieder ab.

Die drei Effekte beim Auftreffen von Sonnenstrahlung auf Glas

Anteil	Kurzzeichen	Beschreibung	Gesamtstrahlung (Index e)*	Sichtbares Licht (Index v)*
Reflexionsgrad	ρ (Rho)	Strahlungsanteil, der an der Grenzfläche zurückgeworfen wird	ρ_e (auch SR)	ρ_v (auch LR)
Absorptionsgrad	α (Alpha)	Strahlungsanteil, der absorbiert und als Wärmestrahlung wieder emittiert wird	α_e (auch SA)	α_v (auch LA)
Transmissionsgrad	τ (Tau)	Strahlungsanteil, der ungehindert durch das Glas hindurch geht	τ_e (auch ST)	τ_v (auch LT)

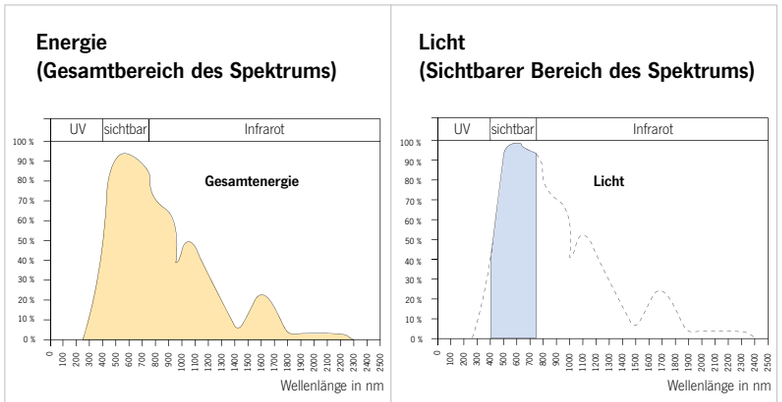
* Index e = energy, Index v = visible. Für die sekundäre Wärmeabgabe q nach draußen wird häufig ebenfalls der Index e verwendet, wobei hier e = external bedeutet. Zur Vermeidung von Verwirrung wird die sekundäre Wärmeabgabe q nach draußen in diesem Kapitel mit dem Index a bezeichnet. Bei den für Glaskennwerte teilweise benutzten Alternativbezeichnungen bedeutet S = Strahlung (SR = Strahlungsreflexion, SA = Strahlungsabsorption und ST = Strahlungstransmission) und L = Licht mit den Anteilen LR, LA und LT.

Beim Reflexionsgrad
ρ = 1 (α = 0 und τ = 0):
wird alle Strahlung reflektiert
(idealer Spiegel).

Beim Absorptionsgrad
α = 1 (ρ = 0 und τ = 0)
wird alle Strahlung absorbiert
(so genannter schwarzer Körper).

Beim Transmissionsgrad
τ = 1 (ρ = 0 und α = 0)
wäre der Gegenstand vollkommen transparent.

Bei der Angabe von strahlungsphysikalischen Kennwerten für Verglasungen (siehe auch nachfolgendes Kapitel 3.3.4) wird zwischen Werten für das gesamte Sonnenenergiespektrum und Angaben für den Teilbereich des sichtbaren Lichts unterschieden:



Durch Maßnahmen am Glas können die drei Anteile (Reflexion, Absorption und Transmission) gezielt beeinflusst werden. Verändert man einen Anteil, hat das Einfluss auf die beiden anderen. Ein Anteil kann deshalb auch immer durch Beeinflussung der beiden anderen Anteile erhöht oder reduziert werden.

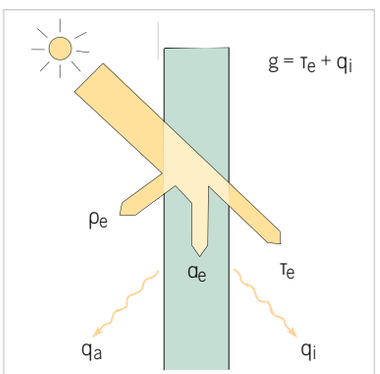
Möglichkeiten zur Beeinflussung der strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Glas

Anteil	Möglichkeiten zur Beeinflussung dieses Anteils
Reflexion	▪ Erhöhung der Reflexion durch spezielle Beschichtungen (Sonnenschutz) ▪ Verringern der Reflexion durch spezielle interferenzoptische Beschichtung (entspiegeln)
Absorption (+ Emission)	▪ Reduktion der Absorption durch Verwendung von Weißglas ▪ Erhöhung der Absorption durch Einsatz von eingefärbtem Glas ▪ Verringern der Emission durch spezielle Beschichtungen (low-E)
Transmission	▪ Reduktion der Transmission durch Erhöhung des Reflexions- und/oder Absorptionsanteils ▪ Erhöhung der Transmission durch Reduktion des Reflexions- und/oder Absorptionsanteils

3.3.4 Strahlungstechnische Kennwerte von Glas

Die lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen für Gebäude werden nach den Vorgaben der Norm DIN EN 410 bestimmt und dienen als Grundlage für licht-, heizungs- und klimatechnische Berechnungen.

Neben dem U_g-Wert als Maß für die Wärmedämmung ist der **Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)** der wichtigste Kennwert einer Verglasung. Er wird zur Berechnung der Energiebilanz von Gebäuden benötigt und gibt an, welcher Anteil der gesamten auftreffenden Sonnenenergie ins Rauminnere gelangt.
Der g-Wert setzt sich aus zwei Teilen zusammen: aus der direkten Strahlungstransmission (τ_e) und der sekundären Wärmeabgabe nach innen (q_i).



Er liegt zwischen 0 und 1. Ein g-Wert von 1 entspricht einem Energiedurchlass von 100 %. Unbeschichtetes Einfachglas hat einen g-Wert von ca. 0,85, d. h. 85 % der eingestrahlten Energie kommt auf direktem und indirektem Weg ins Rauminnere, der Rest wird reflektiert bzw. absorbiert. Für Sonnenschutzzwecke sollte der g-Wert möglichst niedrig, für solare Gewinne im Winter jedoch möglichst hoch sein.

Der **Lichttransmissionsgrad τ_V (auch LT-Wert)** gibt an, wieviel Prozent des sichtbaren Strahlungsanteils des Sonnenspektrums von außen nach innen übertragen werden. Er ist abhängig von der Glasdicke, der Zusammensetzung des Glasgemenges sowie gegebenenfalls von der Beschichtung der Scheibe. Nach DIN EN 410 wird er auf die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges bezogen. Unbeschichtetes Kalk-Natron-Silikatglas hat einen Lichttransmissionsgrad von ca. 90 %.

Der Lichtdurchlässigkeit von Glas kommt eine besondere Bedeutung zu: Natürliches Tageslicht ist nicht nur für das Auge angenehmer als künstliche Beleuchtung, Tageslicht beeinflusst auch unseren Stoffwechsel und ist wichtig für das Wachstum von Zimmerpflanzen. Gute Ausnutzung von Tageslicht durch verglaste Flächen spart Energie. Blendfreie Beleuchtung mit Tageslicht ist auch für die optimale Gestaltung von Arbeitsplätzen bedeutsam.

Neben anderen Werten spielt auch der **Farbwiedergabeindex R_a** eine Rolle bei der Auswahl von Verglasungen. Das Sonnenlicht besteht aus einzelnen farbigen Wellenlängenbereichen, von rot über orange, gelb, grün und blau nach violett und erscheint nur in der Summe als weiß. Werden die Wellenlängenbereiche in der Durchsicht von innen nach außen unterschiedlich durchgelassen oder in der Draufsicht von außen nicht gleichmäßig reflektiert, verändert dies den Farbeindruck. Dies kann die ästhetische Wirkung und das Wohlbefinden im Raum beeinflussen. Der Farbwiedergabeindex wird nach DIN EN 410 mit einer Normlichtquelle gemessen. Der Maximalwert für eine vollkommen farbneutrale Farbwiedergabe ist 100. Mit den heutigen Glasbeschichtungen für Sonnen- und Wärmeschutz ist eine

gute bis sehr gute Farbwiedergabe erreichbar. Die Gläser erscheinen trotz der Beschichtung weitestgehend farbneutral.

Die **Selektivitätskennzahl S** bezeichnet das Verhältnis von Lichttransmissionsgrad τ_V (auch LT-Wert) zum Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) und ist eine wichtige Kenngröße für Sonnenschutzgläser. Sonnenschutzverglasungen sollen möglichst viel Gesamtenergie der Sonnenstrahlung abblocken (g-Wert niedrig), bei trotzdem möglichst hoher Lichtdurchlässigkeit (τ_V). Eine hohe Selektivitätskennzahl bedeutet guten Sonnenschutz und trotzdem viel Tageslicht.

$$S = \frac{\tau_V}{g}$$

Der **b-Faktor (auch shading coefficient SC oder mittlerer Durchlassfaktor)** wird zur Berechnung von Kühllasten benötigt. Nach VDI 2078 bezeichnet er das Verhältnis aus Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der betrachteten Verglasung zum g-Wert eines Zweifach-Isolierglases ohne Beschichtung (0,80). Ein hoher b-Faktor wie z. B. 0,9 bedeutet geringe Sonnenschutzwirkung. Ein niedriger Wert wie z. B. 0,3 zeigt eine gute Sonnenschutzwirkung der Verglasung an.

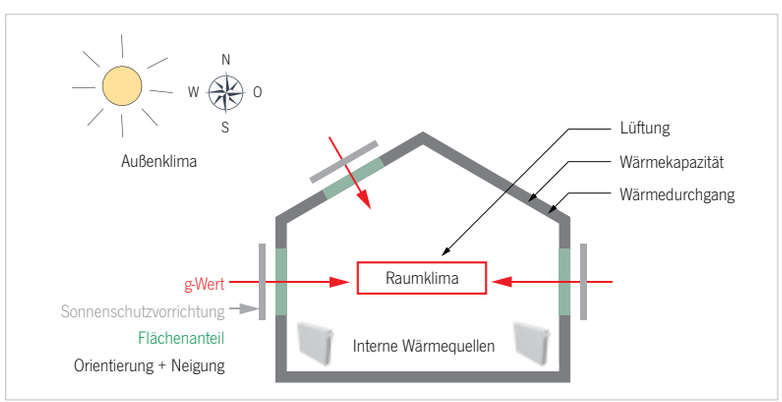
$$\text{b-Faktor} = \frac{\text{g-Wert}}{0{,}8}$$

Bei der alternativen Ermittlung nach DIN EN 410 wird der g-Wert der Verglasung auf ein 3 mm dickes Einfachglas mit 0,87 bezogen.

3.3.5 Sommerlicher Wärmeschutz

Sommerlicher Wärmeschutz ist abhängig von:

- Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der transparenten Außenbauteile
- Sonnenschutzvorrichtungen an transparenten Außenbauteilen
- Orientierung der transparenten Flächen nach Himmelsrichtung und Neigung zur Vertikalen
- Flächenanteil der transparenten Außenbauteile an der gesamten Gebäudehülle
- Art und Intensität der Lüftung der Räume
- Wärmekapazität, d. h. Wärmespeicherfähigkeit der raumumschließenden Bauteile
- Wärmeleiteigenschaften der nichttransparenten Außenbauteile
- Interne Wärmequellen



Grundsätzlich sind die nachfolgenden bauphysikalischen Aspekte wichtig

1. Was gut ist gegen Kälte im Winter, hilft auch gegen Wärme im Sommer: In einer guten Thermoskanne bleiben heiße Getränke warm und kalte Getränke lange kühl. Kühl- und Gefrierschränke sind heute hervorragend gedämmt und damit sehr energieeffizient im Verbrauch. Ein klimatisiertes Gebäude ist nichts anderes als ein großer Kühlschrank. Eine gut gedämmte thermische Gebäudehülle hilft auch im Sommer, die Hitze draußen zu halten. Deswegen spielen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile (Wände, Decken, Fenster, Türen) auch für den Sonnenschutz eine wichtige Rolle.

2. Neben dem Wärmeeintrag über nichttransparente Flächen sind die im Sommer unerwünschten solaren Gewinne durch Glasflächen entscheidend, die schnell zur Überhitzung von Räumen führen können. Ausgerechnet im Sommer liefert die Sonne in unseren Breitengraden aber eine wesentlich höhere Strahlungsintensität als in den Wintermonaten. Der im Winter erwünschte Treibhauseffekt wird im Sommer zur Hitzefalle. Wichtige Kenngrößen sind der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Gläser sowie der Flächenanteil und die Orientierung der Fenster unter Berücksichtigung von Sonnenschutzmaßnahmen.

3. Die Erwärmung der Räume eines Gebäudes infolge von Sonneneinstrahlung und durch interne Wärmequellen (z. B. Beleuchtung, Personen) ist umso geringer, je speicherfähiger die Bauteile sind, die mit der Raumluft in Verbindung stehen. Je mehr Wärme aus der tagsüber erwärmten Raumluft an den Baukörper abgegeben werden kann, umso weniger heizt sich ein Raum auf. Die Speichermassen dämpfen die Temperaturschwankungen im Tagesverlauf. Wirksam sind hierfür nur Bauteilschichten raumseits vor Wärmedämmschichten. Außenliegende Wärmedämmschichten und innenliegende wärmespeicherfähige Schichten wirken sich in der Regel günstig auf das sommerliche Raumklima aus.

4. Die kritischste Gebäudeausrichtung ist nicht der Süden, sondern wegen der tieferstehenden Sonne der Westen. Hier ist der Sonneneintrag auf Grund direkter Strahlungstransmission am höchsten. Auch nach Osten gerichtete Glasflächen ohne Sonnenschutz führen zu Überhitzung im Sommer, da bereits am Morgen viel Energie in den Raum gelangt. Selbst bei nördlicher Ausrichtung von Fassaden können sich Räume durch diffuse (indirekte) Strahlung noch aufheizen.

Unter Sonnenschutz sind alle Maßnahmen zu verstehen, die den Energieeintrag durch Sonneneinstrahlung reduzieren. Das ist auf vielerlei Wegen, auch durch Kombination der verschiedenen Optionen, machbar:

Nicht variabler Sonnenschutz:
- Bauliche Gestaltung (auskragende Dächer und Balkone über südorientierten Verglasungen)
- Sonnenschutzgläser

Variabler Sonnenschutz:
- Außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen (Fensterläden, Rollläden, Raffstore, Markisen)
- Innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen (Jalousien, Vorhänge, Rollos)
- Sonnenschutzvorrichtungen im Scheibenzwischenraum (Jalousien, Rollos)
- Schaltbare Verglasungen

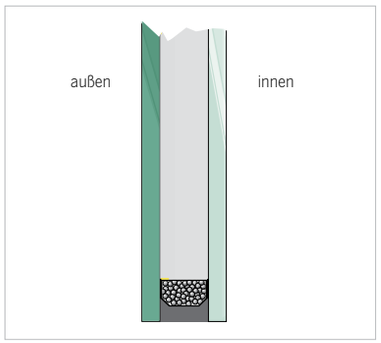
Die Energieeinsparverordnung fordert für Neubauten und für energetische Sanierung von Nutzflächen größer 50 m² den Nachweis eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes. Der Nachweis der Mindestanforderungen muss nach der Norm DIN 4108-2 erfolgen. In Gebäuden dürfen keine unzumutbaren Temperaturbedingungen entstehen, die maschinelle und energieintensive Kühlmaßnahmen zur Folge haben. Daher muss der sommerliche Wärmeschutz möglichst frühzeitig, bereits in der Planungsphase eines Gebäudes mit einbezogen werden. Konstruktive Elemente sind Bestandteil der architektonischen Planung und können nicht mehr oder nur mit erheblichem Aufwand nachträglich an einem fertig gestellten Gebäude angebracht werden.

Sonnenschutzverglasungen mit speziell für diesen Zweck geeigneten Beschichtungen können den Strahlungseintrag wirksam reduzieren, ohne die Durchsicht zu behindern. Die „ideale“ Sonnenschutzbeschichtung würde das sichtbare Licht (380 bis 780 nm) komplett ungehindert durchlassen und alle anderen Bereiche für geringen Energieeintrag durch Reflexion und Absorption komplett abblocken. Durch selektive Beschichtungen wird versucht, diesem Ziel möglichst nahe zu kommen. Das ist wichtig zur Einsparung künstlicher Beleuchtung und für Farbneutralität. Allerdings enthält auch der sichtbare Teil der Sonnenstrahlung viel Energie. Deshalb macht es je nach den individuellen Umständen Sinn, auch diesen zumindest teilweise zu kappen.

Gläser für Sonnenschutzzwecke werden entweder eingefärbt oder beschichtet oder beides.

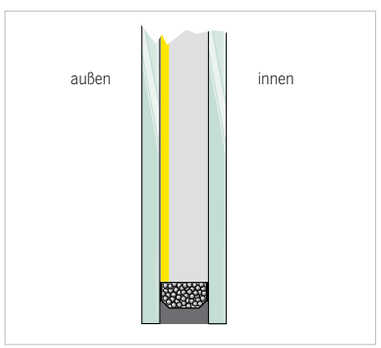
Eingefärbtes Glas

Die Sonnenschutzwirkung eingefärbter Gläser beruht auf der Strahlungsabsorption. Durch Beifügung von Metalloxiden erhält das Glas eine Farbtönung. Dadurch wird der Strahlungsabsorptionsgrad auf recht hohe Werte vergrößert. In der Regel müssen solche Gläser deshalb vorgespannt werden. Durch das Vorspannen erhöht sich die Temperaturwechselbeständigkeit von 40 K auf 150 – 200 K.



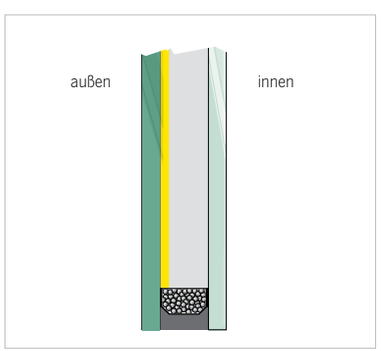
Beschichtetes Glas

Beschichtete Gläser wirken vor allem dadurch, dass eingestrahlte Energie nach außen reflektiert wird. Der Grad der Strahlungsabsorption entscheidet darüber, ob das Glas vorgespannt werden muss.



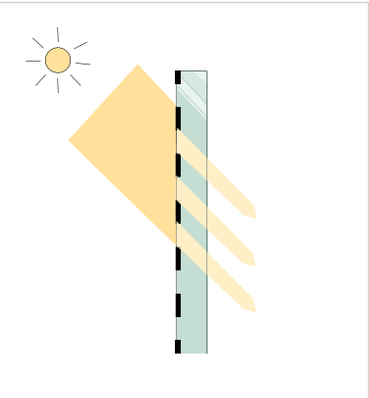
Eingefärbtes und beschichtetes Glas

Wirkt sowohl absorbierend wie auch reflekterend. Muss im Normalfall vorgespannt werden.



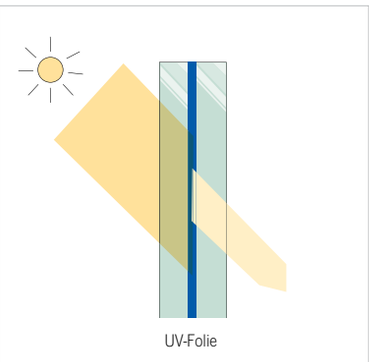
Bedrucktes Glas

Partiell undurchsichtige Verglasungsflächen verringern ebenfalls die Strahlungstransmission, weil die transparente Fläche für die Sonneneinstrahlung geringer ist. Aus der Intensität der Bedruckung, d. h. aus dem Verhältnis von transparenter zu nicht transparenter Fläche, ergibt sich die Sonnenschutzwirkung.



Verbundsicherheitsglas und UV-Transmission

Sonnenschutzgläser haben allgemein eine etwa proportional zum g-Wert reduzierte UV-Transmission gegenüber Gläsern ohne Sonnenschutz. Für erhöhten UV-Schutz bietet sich die Verwendung von Verbundsicherheitsglas mit einer UV-absorbierenden Folie als Zwischenschicht an, die den UV-Anteil nahezu vollständig reduziert. Zu beachten ist allerdings, dass auch Strahlung im sichtbaren Bereich fotochemisch wirksam sein kann und z. B. Farben von Auslagen in Schaufenstern beeinträchtigen kann. Dieses Ausbleichen kann durch Tageslicht, aber auch durch künstliche Beleuchtung verursacht werden.



Verbundsicherheitsglas hat auf Grund der PVB (Polyvinylbutyral) Folie, die sich zwischen den 2 Glasscheiben befindet, einen stark verminderten UV-Transmissionsgrad.

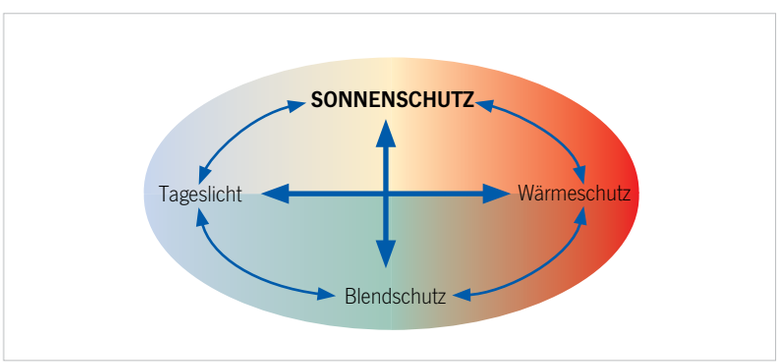
Daher sind diese Art von Gläsern auch nicht für Gewächshäuser geeignet. Auf Grund des fehlenden UV-Anteils im Licht, können Pflanzen nicht lange überleben (Photosynthese).

Aufbau	UV-Transmissionsgrad nach DIN EN 410
2 x 4 mm Float ohne PVB Folie	43,3 %
2 x 4 mm Float + 0,38 mm PVB	≤2,4 %
2 x 4 mm Float + 0,76 mm PVB	≤0,5 %
2 x 4 mm Float + 1,14 mm PVB	≤0,07 %
2 x 4 mm Float + 1,52 mm PVB	≤0,02 %

Die Erfüllung der teils gegenläufigen Forderungen nach Tageslicht, Sonnenschutz, Wärmeschutz und Blendschutz ist eine anspruchsvolle Planungsaufgabe.

Die Entwicklung bleibt nicht stehen, zukunftsweisende Technologien und Komponenten sollen helfen, diese teilweise widersprüchlichen Anforderungen zu lösen. Interessante Ansätze gibt es in vielen Bereichen:

- Hoch reflektierende, in Isolierverglasungen integrierte Jalousiesysteme
- Jalousien und Raffstore mit Lichtlenkung
- In die Gebäudetechnik integrierte Steuerungssysteme
- In den Sonnenschutz integrierte Solarthermie- oder Photovoltaikanlagen
- Schaltbare Verglasungen (smart glazing)
- Smart materials – Materialien die sich auf Grund bestimmter Einflüsse verändern können, wie z. B. Textilien, Membrane und Folien; aber auch Kunststoffe, Beschichtungen und Sandwich-Systeme



3.4 SCHALL

3.4.1 Einleitung

Neben dem Sehvermögen ist das Hören für unsere Wahrnehmung und Orientierung in der Umwelt enorm bedeutsam. Ob etwas als angenehmer Klang oder als störendes Geräusch wahrgenommen wird, hängt zwar von vielen individuellen Faktoren ab. Trotzdem gelten Grenzen für Schalleinwirkungen auf Menschen, die zum Schutz der Gesundheit nicht überschritten werden dürfen. Dabei geht es nicht nur um die direkte Schädigung unseres Gehörsinns, sondern auch um physiologische und psychologische Wirkungen. Lärm wirkt sich auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit aus, er kann erheblichen Stress auslösen, beeinflusst das Herz-Kreislaufsystem und erhöht dadurch das Herzinfarktrisiko. Lärm stört Denkprozesse, behindert Kommunikation und beeinträchtigt Erholung.

Deshalb ist Schallschutz als Planungsaufgabe für Gebäude ein wichtiges Kapitel der Bauphysik. Durch baulichen Schallschutz soll die Lärmbelastung in Gebäuden verringert werden. Dabei geht es nicht nur um das Eindringen von Schall durch die Außenbauteile, sondern auch um seine Weiterleitung innerhalb eines Bauwerks.

In hochverdichteten urbanen Gebieten wohnen Menschen eng beieinander, beeinträchtigt durch alle Arten von Verkehrslärm. Schalldämmende Fenster- und Fassadenkonstruktionen machen auch dort einen angenehmen, ungestörten Aufenthalt in Wohnräumen möglich.

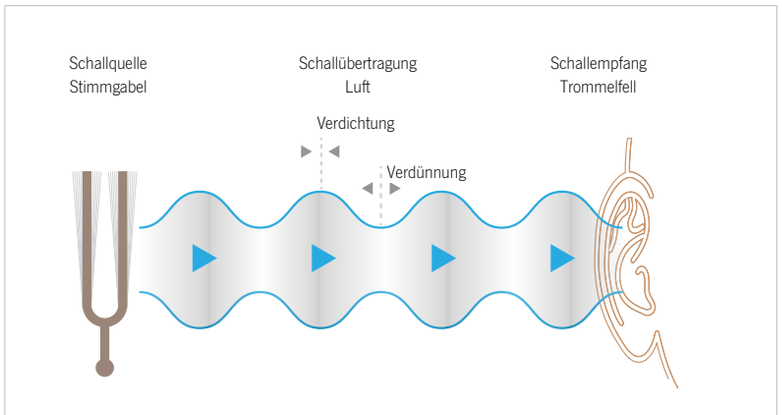
In diesem Kapitel werden aus dem komplexen Gebiet des Schallschutzes neben den Grundlagen der Schallausbreitung die für Glas, Fenster und Fassaden relevanten Kenngrößen erläutert und die Wirkungsweise von Schallschutz mit Glas beschrieben.

3.4.2 Ausbreitung von Schall, Schallarten

Im Gegensatz zu den elektromagnetischen Wellen benötigen Schallwellen zu ihrer Ausbreitung zwingend ein Medium. Im Vakuum gibt es keinen Schall. Schall wird durch mechanische Schwingungen erzeugt. In der Luft sind dies Druckschwankungen, die den atmosphärischen Luftdruck überlagern. In Gasen und Flüssigkeiten schwingen diese Druckwellen in ihrer Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwellen), in Festkörpern gibt es auch andere kompliziertere Wellenformen.

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig vom Wellentyp und Medium. In der Luft beträgt sie ca. 343 m/s.

Darstellung einer Schallwelle mit Druckschwankungen der Luft



Akustik ist die Lehre vom Schall, die sämtliche Aspekte wie die Entstehung und Erzeugung, die Ausbreitung, die Beeinflussung und die Analyse von Schall untersucht. Das Teilgebiet der **Bauakustik** befasst sich mit dem Schallschutz von Gebäuden. Ziel ist der Schutz von Aufenthaltsräumen gegen eindringende Geräusche aus anderen Räumen, aus gebäudetechnischen Anlagen und gegen Außenlärm. **Raumakustik** hingegen kümmert sich je nach geplanter Nutzung um die akustische Qualität von Räumen, um beispielsweise die Sprachkommunikation in Büroräumen oder Nachhallzeiten in Konzertsälen und Sportstätten optimal zu gestalten.

Schall, der sich in Luft ausbreitet, heißt **Luftschall**, im Gegensatz zum **Körperschall**, der durch feste Medien weitergeleitet wird. An Bauteiloberflächen kann Körperschall als Luftschall abgestrahlt werden und umgekehrt. **Trittschall** ist Körperschall, der durch Gehen in Gebäuden hervorgerufen wird. Die Ausbreitung von Luftschall wird in physikalisch komplexen Vorgängen durch Beugung an Hindernissen oder Öffnungen und durch Reflexion an Oberflächen beeinflusst. Dadurch entstehen diverse akustische Effekte wie der Nachhall in Räumen oder das Echo.

Erreicht eine Schallwelle das Ohr, gerät das Trommelfell in Schwingung und erzeugt durch komplizierte Vorgänge das Hören. Eine einzelne Schwingung mit einer bestimmten **Frequenz** ergibt einen Ton, wobei die Frequenz die Anzahl von Schwingungen pro Sekunde bezeichnet, die Einheit ist Hertz, 1 Hz = 1/s. Der für das Einstimmen von Instrumenten wichtige Kammerton a ist auf 440 Hz festgelegt. Mit Erhöhung der Frequenz steigt die Tonhöhe. Bei bestimmten Frequenzabständen ergeben sich Intervalle, wie z. B. die Oktaven bei Frequenzverdopplung bzw. -halbierung, oder Terzen, Quarten und Quinten. Diese Intervalle spielen bei der Bildung harmonischer Klänge eine Rolle. Die Überlagerung mehrerer Töne lässt einen **Klang** entstehen, viele unzusammenhängende Töne ergeben gemeinsam ein **Geräusch.**

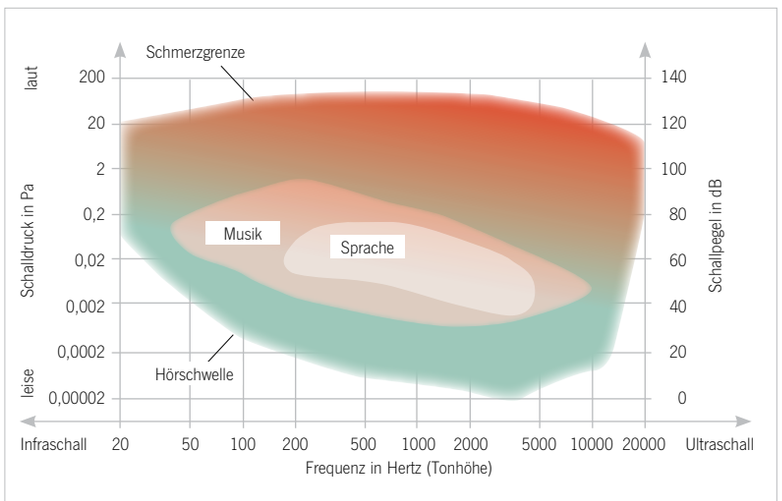
Der **Hörfrequenzbereich** des Menschen reicht von 16 bis 20.000 Hz, Infraschall liegt unterhalb des menschlichen Hörfrequenzbereiches, Ultraschall darüber.

Lärm wird als unerwünschter Hörschall definiert, der zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann. Allerdings machen allein schon die unterschiedlichen Vorlieben im Musikgeschmack deutlich, dass es sehr von der individuellen Bewertung durch die wahrnehmende Person abhängt, ob Schall als störender Lärm empfunden wird oder glücklich macht.

Mit **Interferenz** wird die Überlagerung von Wellen bezeichnet, die sich dadurch gegenseitig verstärken oder abschwächen können. Durch künstlich erzeugte, exakt entgegengesetzte Schwingungen (Antischall) kann Schall sogar ausgelöscht werden. Unterscheiden sich zwei überlagerte Schallschwingungen nur geringfügig in ihrer Frequenz, führt das zu einem An- und Abschwellen (Schwebung).

Der **Schalldruck** gibt die Kraft pro Fläche an, die durch eine Schallschwingung ausgeübt wird. Er ist ein Maß für die Stärke eines Schallereignisses und bestimmt die Wahrnehmbarkeit. Das menschliche Ohr kann Schalldrücke zwischen 0,00002 Pascal bis etwa 200 Pascal wahrnehmen. Diese enorme Bandbreite über 7 Zehnerpotenzen zeigt, dass der Hörvorgang nicht linear abläuft, sondern dynamisch. Die doppelte Lautstärke bedeutet nicht einen doppelten, sondern einen vielfachen Schalldruck. Deswegen wird für die Bewertung von Lautstärke eine logarithmische Skala gewählt, die eine anschauliche Darstellung ermöglicht. Durch logarithmische Umrechnung und den Bezug auf die menschliche Hörschwelle wird der Schalldruck zum **Schalldruckpegel** (auch kurz: Schallpegel), der in **Dezibel (dB)** angegeben wird und die Stärke eines Schallereignisses beschreibt. Die menschliche Hörschwelle bei 0,00002 Pa wird dadurch mit 0 dB definiert, das obere Ende der Skala bei 200 Pa ergibt 140 dB.

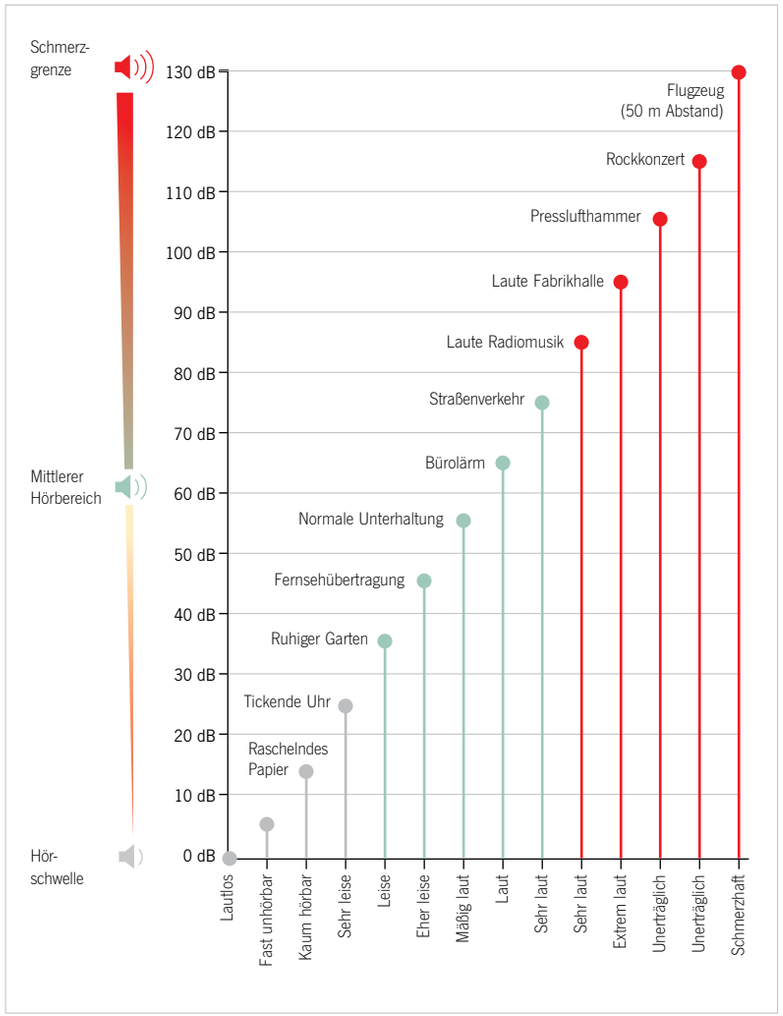
Wahrnehmungsbereich des menschlichen Ohres



(Quelle: www.staedtebauliche-laermfibel.de)

Die Schmerzgrenze für ein Hörereignis liegt bei 120 bis 130 dB. Dieser sehr hohe Schalldruckpegel verursacht auch bei kurzzeitiger Einwirkung eine Schädigung des Gehörs. Bei längerfristiger Einwirkung liegt die Grenze für Gehörschäden bereits bei 85 dB.

Typische Geräuscharten mit ihrer Lautstärke und subjektives Empfinden:



Der Schalldruckpegel ist eine technische Größe, die keine verbindlichen Rückschlüsse auf die subjektive menschliche Empfindung bei der Wahrnehmung zulässt. Als Faustformel gilt: Eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB wird in etwa als Verdopplung der Lautstärke wahrgenommen. Der menschliche Hörvorgang ist jedoch von der Tonhöhe abhängig, d. h. die Wahrnehmung von Lautstärke ist über den gesamten Hörfrequenzbereich nicht gleichmäßig verteilt. Im Bereich zwischen 2.000 und 5.000 Hz hören wir am besten. Bei tieferen und höheren Frequenzen ist für die gleiche Lautstärkewahrnehmung ein höherer Schalldruck notwendig, weil die Empfindlichkeit des Gehörs in Richtung der Ränder des menschlichen Hörfrequenzbereichs abnimmt. Dieser frequenzabhängige Verlauf der Wahrnehmung von Schall wird bei Bewertungsverfahren für Lautstärke durch Frequenzbewertungskurven berücksichtigt.

Der **bewertete Schalldruckpegel** wird durch Zerlegen eines gemessenen Spektrums in schmale Frequenzbänder und Gewichtung der Bänder mit der Wahrnehmung ermittelt. Der Gesamtpegel ergibt sich durch Aufsummierung der gewichteten Teilpegel.

3.4.3 Bauakustik

Schallemission bezeichnet das Aussenden von Schall durch eine Schallquelle, **Schallimmission** die Einwirkung von Schall an anderer Stelle. Für die Einwirkung von Lärm werden vom Gesetzgeber je nach Gebiet Immissionsgrenzwerte vorgegeben.

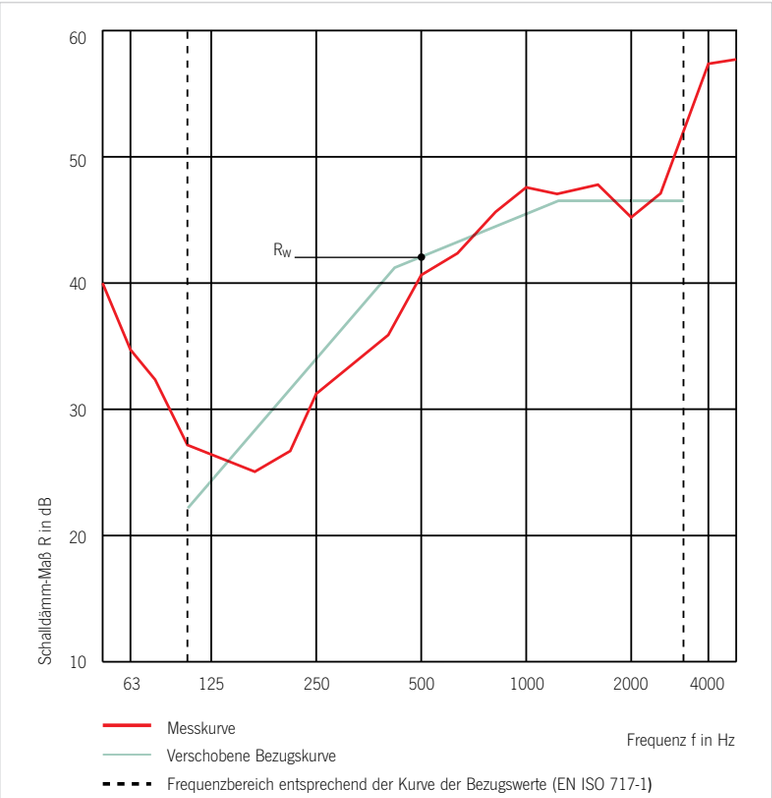
Als **Schallschutz** wird insbesondere der Schutz vor Straßen-, Flug- und Schienenlärm sowie Gewerbe- und Nachbarschaftslärm bezeichnet. Dabei wird zwischen aktivem und passivem Schallschutz unterschieden: Aktiver Schallschutz verringert Schallemissionen, wie z. B. Schwingungsisolierung von Geräten, Flugverbote oder Flüsterasphalt. Passiver Schallschutz reduziert die Schalleinwirkung am Immissionsort. Letzteres geschieht hauptsächlich durch Maßnahmen zur Schalldämmung, mit denen die Ausbreitung von Luft- und Körperschall reduziert wird.

Schalldämmende Bauteile reduzieren die Schallübertragung durch ausreichend hohe Bauteilmassen, mehrschalige Konstruktionen oder konstruktive bauliche Trennung, wie z. B. bei schwimmendem Estrich. Wird Schalldämmung schlecht ausgeführt, beeinträchtigen Schallbrücken sowie ungeplante Öffnungen und Spalten das Ergebnis. Deshalb ist für die spätere Wirksamkeit schalldämmender Bauteile nicht nur der Bauteilkennwert, sondern immer auch die Qualität des Einbaus entscheidend.

Prüfstände zur Messung von Bauteilen, wie z. B. Verglasungen oder Fenster, bestehen aus zwei aneinandergrenzenden Räumen, in deren Trennwand das zu prüfende Bauteil mit der Abmessung 1,23 x 1,48 m eingebaut wird. Dabei wird durch entsprechende bauliche Maßnahmen dafür gesorgt, dass auch wirklich nur die Schallübertragung durch das Bauteil selbst und nicht zusätzlich eine so genannte Flankenübertragung über den Bauteilanschluss gemessen wird. Der auf das Bauteil im Senderaum auftreffende Schall wird in den Empfangsraum übertragen, indem er das Bauteil in Schwingungen versetzt, die wiederum die Luft im Empfangsraum zu Schwingungen anregen.

Nach den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 10140-2 zum Prüfverfahren für die Luftschallmessung wird im Senderaum im Frequenzbereich von 100 bis 5.000 Hz abschnittsweise Schall in Terzschritten erzeugt. Sowohl im Senderaum als auch im Empfangsraum werden dazu die energetisch gemittelten Schalldruckpegel gemessen und daraus jeweils das frequenzabhängige Schalldämm-Maß R bestimmt. Durch eine normierte Verfahrensweise wird aus diesem Spektrum ein einzelner, repräsentativer Zahlenwert (Einzahlwert), das **bewertete Schalldämm-Maß R_W**, ermittelt. Nach DIN EN ISO 717-1 wird hierfür eine von der Norm vorgegebene Bezugskurve in 1 dB-Schritten so lange vertikal verschoben, bis die ungünstigen Abweichungen (Messwertkurve liegt unter Bezugskurve) im Mittel nicht mehr als 2 dB betragen. R_W ist dann derjenige Wert, der an der Bezugskurve bei 500 Hz auf der y-Achse abgelesen wird.

Beispiel Schalldämmkurve und Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_W



Aus dem bewerteten Schalldämm-Maß R_W allein lassen sich keine Rückschlüsse auf das Schalldämmverhalten bei einzelnen Frequenzen ziehen. Je nach Situation kann Lärm aus unterschiedlichen Frequenzanteilen bestehen, z. B. an einer Straßenkreuzung mit anfahrenden Lastwagen aus einem größeren Anteil an tiefen Frequenzen.

In solchen Fällen kann es hilfreich sein, neben dem Einzahlwert R_W auch die Schalldämmkurve im Detail zu betrachten. Bauteile mit demselben Wert für das bewertete Schalldämm-Maß können sich in den einzelnen Frequenzbereichen trotzdem signifikant unterscheiden.

Beim **bewerteten Bau-Schalldämm-Maß R'_W** („R-Strich-w“) symbolisiert der Apostroph, dass das Bauteil im eingebauten Zustand inklusive aller Nebenwege des Schalls gemessen wurde.

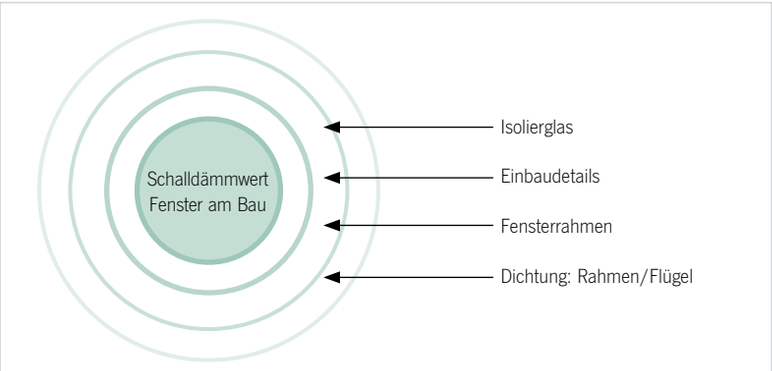
Um unterschiedliche Frequenzspektren z. B. von Wohn- und Verkehrsgeräuschen zu berücksichtigen, wurden die **Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr}** eingeführt. Sie bezeichnen einen bauteilspezifischen Wert in dB, der zum bewerteten Schalldämm-Maß R_W addiert werden muss, zur Anpassung an bestimmte Standardlärmsituationen. Der Anpassungswert C betrifft wenig tiefe Frequenzen wie Lärm aus Wohnaktivitäten, Schienenverkehr mit mittlerer und hoher Geschwindigkeit, Lärm von Schulen und spielenden Kindern. Der Anpassungswert C_{tr} dient der Beurteilung von Lärmsituationen mit großen Tieftonanteilen, wie z. B. städtischen Straßenverkehr, Schienenverkehr mit geringen Geschwindigkeiten, Fluglärm oder Lärm von Diskotheken. Die Zahlenwerte von C und C_{tr} liegen zwischen 0 und -10 dB.

Die Schreibweise ist beispielsweise wie folgt: R_W (C; Ctr) = 40 (-1; -5) dB. Dieses Bauteil hat eine Schalldämmung in Bezug auf Wohnlärm von 40 dB - 1 dB = 39 dB und in Bezug auf Verkehrslärm von 40 dB – 5 dB = 35 dB.

Folgende Besonderheiten treten bei ein- oder mehrschaligen Bauteilen auf:

- Auftreffender Luftschall erzeugt in Platten eine Biegewelle, die unter anderem von der Biegesteifigkeit der Platte abhängt. Kommt es dabei zu Resonanz, d. h. zum Mitschwingen in der Luftschallfrequenz, führt das zu erhöhter Schalltransmission bzw. zu charakteristischen Einbrüchen der Schalldämmkurve, dem so genannten Koinzidenz-Einbruch. Die Koinzidenz-Grenzfrequenz ist die niedrigste Frequenz, bei der diese Spuranpassung auftreten kann.
- Zwei- oder mehrschalige Bauteile wie z. B. ein Zweifach-Isolierglas wirken als ein Masse-Feder-System. Aus der Kopplung der beiden Scheiben mit der dazwischenliegenden Gasschicht ergibt sich eine weitere Resonanzfrequenz, bei der die Schallkurve einbricht (siehe auch Kapitel 3.4.4 Schall und Glas).

Einflüsse auf das bewertete Schalldämm-Maß eines Fensters am Bau

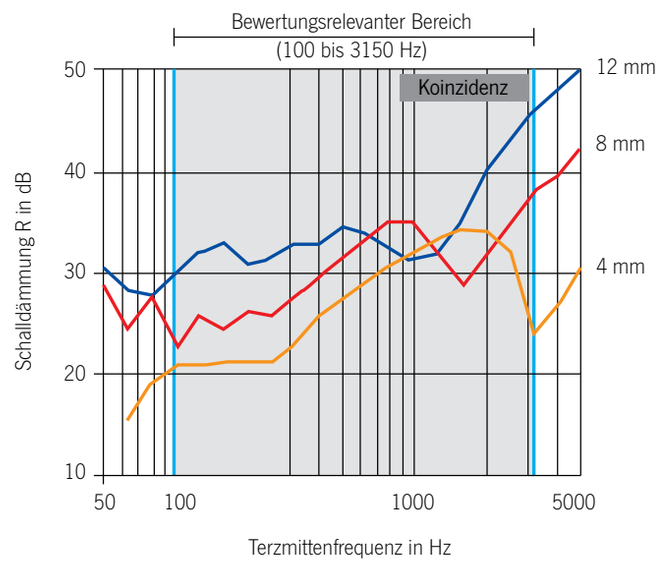


Die Schalldämmung von zusammengesetzten Bauteilen wie Fenstern wird nicht alleine durch das Isolierglas geprägt, obwohl dieses mit 70 bis 80 % den größten Flächenanteil besitzt. Deshalb darf die Schalldämmung der Isolierglasscheibe nicht mit der des Fensters gleichgesetzt werden. Insbesondere hohe Anforderungen an die Schalldämmung des gesamten Fensters sind nur dann erreichbar, wenn alle Komponenten, d. h. Verglasung, Fensterrahmen (Material und Abmessungen), der Beschlag und die Anzahl der Verriegelungen sowie Anzahl und Art der Falzdichtungen sorgfältig miteinander abgestimmt sind und der Fensteranschluss zum Baukörper richtig geplant ist. Eine fachgerechte Montage ist in jedem Fall notwendig. Darüber hinaus kann es wichtig sein, die Einbausituation zu beachten: In hohen Gebäuden weicht die Richtung des Schalleinfalls in den oberen Etagen von der Situation im Prüfstand ab. Bei schrägem bis streifendem Einfall ist die tatsächliche Schalldämmung niedriger.
Für die weiterführende Charakterisierung von R_W, z. B. bei zusammengesetzten Bauteilen, bei Berücksichtigung der Schallübertragung über flankierende Bauteile, bei Messung am Bau oder bei Berechnung des erforderlichen Schalldämm-Maßes für die Kombination von Außenwand und Fenstern wird auf die aktuelle Fassung der DIN 4109 verwiesen. Diese Norm definiert die Mindestanforderungen in Abhängigkeit von Gebäude- und Nutzungsart, aus denen sich die benötigten Bauteilkennwerte ergeben. Nach dieser Norm muss in Deutschland der Schallschutznachweis für ein geplantes Gebäude geführt werden. Wird mehr Komfort durch erhöhten Schallschutz gewünscht, muss dies durch den Bauherrn bereits bei Beginn der Planung festgelegt werden.
Die Europäische Bauprodukten-Verordnung EU-BauPVO Nr. 305/2011 schreibt in den Grundanforderungen an Bauwerke für den Schallschutz fest: „Das Bauwerk muss derart entworfen und ausgeführt sein, dass der von den Bewohnern oder von in der Nähe befindlichen Personen wahrgenommene Schall auf einem Pegel gehalten wird, der nicht gesundheitsgefährdend ist und bei dem zufriedenstellende Nachtruhe-, Freizeit- und Arbeitsbedingungen sichergestellt sind.“
Schallschutz ist eine Planungsleistung!

3.4.4 Schall und Glas

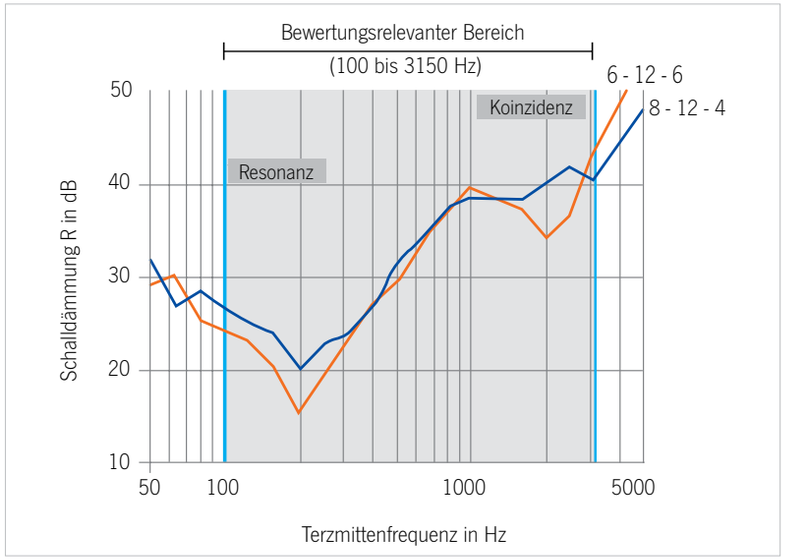
Generell gilt für die Schalldämmung von Glasprodukten: **Einfachglas** (Monolithische Scheiben) hat bei gleicher Dicke unabhängig von der Glasart (Float, ESG, TVG, ...) immer dasselbe Schalldämm-Maß. Ornamentglas wird akustisch beschrieben durch die Daten für Einfachglas mit der nächstniedrigen Dicke (Ornamentglas 6 mm = Daten für Einfachglas in 5 mm Dicke). Je dicker die Einzelscheibe, umso besser die Schalldämmung.

Schalldämmkurven für drei verschiedene Glasdicken



Verbundglas/Verbundsicherheitsglas gibt es zur Verwendung als Schalldämmglas auch mit verbesserten schalldämmenden Eigenschaften. Hierfür werden als Zwischenlagen weiche, elastische PVB-Folien mit dämpfenden Schallschutzeigenschaften verwendet. Da die Elastizität dieser Schichten von der Temperatur abhängt, können tiefe Temperaturen die Schalldämmung beeinträchtigen. Deshalb sollten solche Verbundgläser in Isolierglasaufbauten bevorzugt auf der Warmseite eingesetzt werden. Die früher zur Verbesserung der Schalldämmung verwendeten Verbundschichten aus Gießharz kommen heute praktisch nicht mehr zum Einsatz.

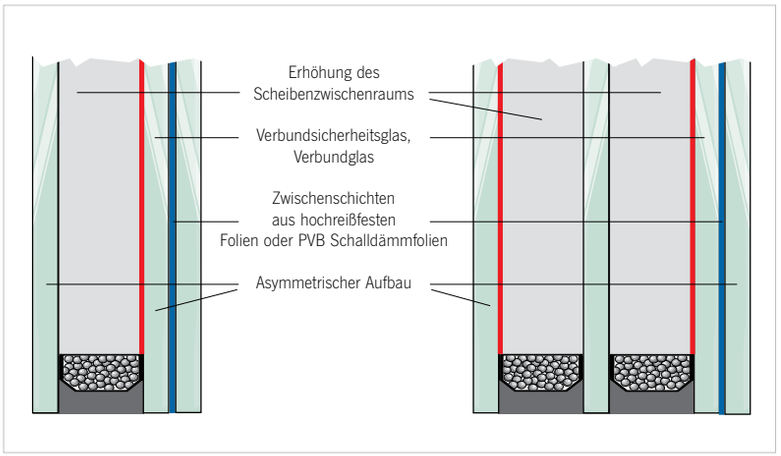
Vergleich eines symmetrischen Isolierglasaufbaus mit einem unsymmetrischen Aufbau



Neben der Verwendung von VG/VSG mit schalldämmenden Eigenschaften lässt sich die Schalldämmwirkung von Mehrscheiben-Isolierglas durch weitere Faktoren beeinflussen:

- Masse: Dickere Scheiben sind durch mehr dämpfende Masse besser schalldämmend als dünne Gläser, die Koinzidenz-Grenzfrequenz verschiebt sich zu tieferen Werten.
- Scheibenzwischenraum: Ein größerer SZR wirkt sich ebenfalls günstig auf das Schalldämm-Maß aus. Die Doppelscheibenresonanz verschiebt sich dadurch zu tieferen Frequenzen, was sich günstig auf die Bewertung auswirkt. Allerdings ist zu beachten, dass eine Veränderung des SZR auch die Wärmedämmung verändern kann.
- Asymmetrischer Scheibenaufbau: Eine Kombination von Gläsern unterschiedlicher Dicken wirkt sich positiv auf die Schalldämmung aus, weil dann die Koinzidenz-Grenzfrequenzen der Einzelscheiben nicht zusammenfallen.
- Gasfüllung: Die heute üblichen Füllgase Argon und Luft sind bezüglich der Schalldämmung als gleichwertig zu betrachten. Das schwerere Krypton kann die Schalldämmung verbessern, allerdings nur bei höheren Frequenzen. Im tieferen Bereich wird die Schalldämmung durch Krypton verringert. Die Verwendung von Schwefelhexafluorid SF6 für Schallschutzgläser ist auf Grund der extremen Klimaschädlichkeit per EU-Verordnung inzwischen verboten.

Leistungsfähige Schalldämmgläser ergeben sich vor allem aus der Kombination dieser Maßnahmen



3.4.5 Schalltechnische Kennwerte von Glas

Die Europäische Norm DIN EN 12758 regelt die Bestimmung der Schalldämmwerte für alle durchsichtigen, durchscheinenden und opaken Glaserzeugnisse, die für den Gebrauch in verglasten Bauteilen von Gebäuden mit Schallschutzeigenschaften vorgesehen sind und die entweder als Hauptzweck oder als ergänzende Charakteristik Schalldämmung aufweisen. Die Schalldämmung wird in Leistungserklärung und CE-Zeichen aufgeführt. Die Norm enthält eine Tabelle, der standardisierte Schalldämmwerte entnommen werden können.

Ermittelt werden die Schalldämmkurven nach DIN EN ISO 10140-2 und bewertet nach DIN EN ISO 717-1. Außerdem gibt DIN EN ISO 717-1 vor, wie der R_W-Wert angegeben werden muss (siehe Kapitel 3.4.3).

Die Kennwerte von Glas beziehen sich immer auf das gemäß der Prüfnorm vorgegebene Format 1,23 x 1,48 m. Andere Scheibenformate können den R_W-Wert um 1 bis 3 dB verändern.

Im eingebauten Zustand sind die schalldämmenden Eigenschaften durch den Einfluss von verschiedenen, im Kapitel 3.4.3 bereits aufgeführten Faktoren verändert.

3.5 ENERGIESPARENDES BAUEN

3.5.1 Einleitung

Die weltweite Reduzierung des Energieverbrauchs zur Abschwächung des Klimawandels ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit. Neben vielen anderen Maßnahmen muss dazu vor allem der hohe Energiebedarf von Gebäuden für Raumheizung, Klimatisierung, Warmwasserbereitung, Strom, Beleuchtung, usw. reduziert werden. Über die schlichte Einsparung von Energie hinaus muss in allen Bereichen des Energieverbrauchs die Effizienz in der Nutzung verbessert und der Anteil der erneuerbaren Energien vergrößert werden. Nur so sind die Klimaschutzziele erreichbar.
In diesem Kapitel werden die Anforderungen und Grundprinzipien des energiesparenden Bauens vorgestellt, die wichtige Rolle von Glas in diesem Zusammenhang erläutert.

3.5.2 Anforderungen für Neubau und Bestand

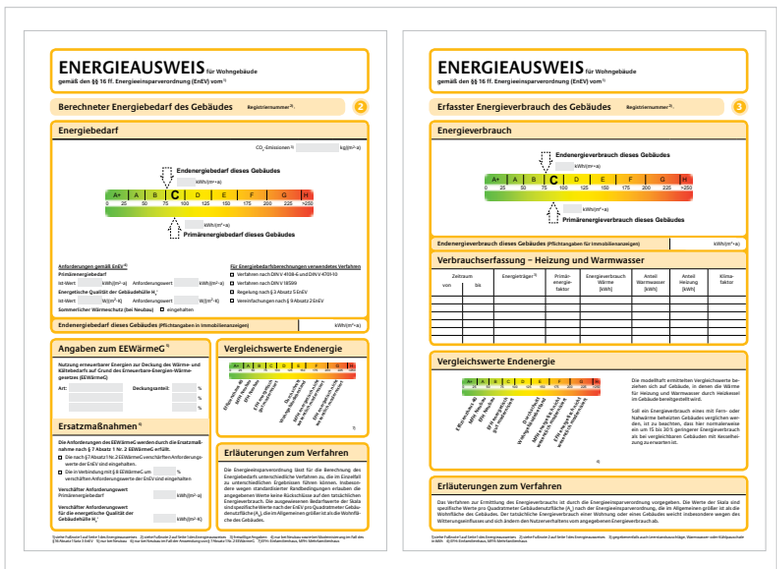
Mit der Neufassung der seit 2002 bestehenden europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden Nr. 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 (EPBD = Energy Performance Building Directive) hat die EU ihre Anforderungen an die Mitgliedsländer zur Minimierung des Energieverbrauchs und zur Erhöhung der Energieeffizienz verschärft. Ziel ist, die Energieabhängigkeit der Union zu verringern und die Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber den Werten von 1990 um mindestens 20 % bzw. bis 2030 um mindestens 40 % zu senken. Dadurch soll die Erderwärmung gegenüber vorindustriellen Werten auf maximal 2 Grad begrenzt werden.

In der gesamten EU gilt für Bauten der öffentlichen Hand bereits ab 2019, für alle anderen ab 2021 bei Neubau der Niedrigstenergie-Gebäudestandard. Dieser Standard ist zwar nicht im Detail definiert, aber klar ist trotzdem: Ohne eine hocheffizient gedämmte thermische Gebäudehülle lassen sich die ambitionierten Klimaziele nicht verwirklichen. Die EPBD-Richtlinie muss in allen Staaten der EU durch nationale Verordnungen umgesetzt und diese spätestens alle 5 Jahre überprüft werden. Dabei gibt es national unterschiedliche Vorgehensweisen.

In Deutschland erfolgt die Umsetzung der EU-Richtlinie durch die kontinuierliche Fortschreibung der Energieeinsparverordnung (EnEV). Zuletzt wurden die primärenergetischen Anforderungen gemäß EnEV 2014 zum 1.1.2016 weiter verschärft. Gegenüber den bisher gültigen Regelungen gelten für Neubauten nun um 25 % strengere Anforderungen an den Primärenergiebedarf. Im Einzelnen wurde die Grenze für den maximal zulässigen Transmissionswärmeverlust H'_T von Wohngebäuden um ca. 20 % weiter abgesenkt, und bei den Anforderungen an die Gebäudehülle für Neubau im Nichtwohnbau gab es ebenfalls eine Verschärfung um 20 %. Aktuell sollen in Deutschland als nächste Stufe die Gesetze EnEV (= Energieeinsparverordnung), EnEG (= Energieeinsparungsgesetz) und EEWärmeG (= Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz) zu einem Gesetz, dem GEG = Gebäudeenergiegesetz zusammengefasst werden (Stand 2017).

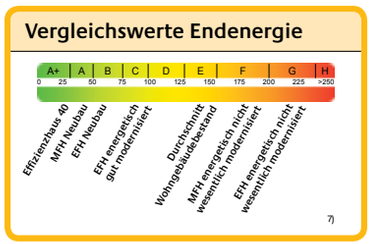
Durch den Energieausweis, der seit der EnEV 2009 bei Neubau oder bei Änderung/Erweiterung von bestehenden Gebäuden ausgestellt werden muss, soll für Bauherren, Käufer oder Mieter mehr Transparenz geschaffen werden. Seit der EnEV 2014 gelten auch hierfür strengere Regeln: Der Energieausweis muss Käufern bzw. Mietern bei Besichtigung unaufgefordert vorgelegt und nach Abschluss von Kauf- oder Mietvertrag übergeben werden. Bestimmte Angaben des Energieausweises müssen zwingend in Immobilienanzeigen aufgeführt werden. Die Darstellung des berechneten oder alternativ verbrauchsorientierten Jahres-Endenergieverbrauchs wurde seit 2014 in einem neu skalierten Bandtacho zusätzlich mit Energieeffizienzklassen ausgestattet. Zusätzlich werden im Ausweis jetzt auch Empfehlungen für Modernisierungsmaßnahmen aufgeführt und der Primärenergiebedarfswert genannt. Jeder Ausweis erhält eine Registrierungsnummer. Der Ausweis muss in behördlich genutzten Gebäuden mit mehr als 250 m² Nutzfläche und in privaten Gebäuden mit starkem Publikumsverkehr ab 500 m² ausgehängt werden.

Energieausweis für Wohngebäude



Energieausweis für Wohngebäude, links Bedarfsausweis, rechts Verbrauchsausweis. Quelle: dena

Energieeffiziente Immobilien sollen attraktiver werden, weil durch den Energiepass die energetische Gebäudequalität deutlich wird.



Vergleichswerte zum Endenergieverbrauch aus dem Energieausweis von Wohngebäuden mit den Effizienzklassen H bis A+. Der rote Bereich des Bandtachos beginnt jetzt bereits bei >250 kWh/m²a und nicht wie bisher erst bei ≥400 kWh/m²a.

Quelle: dena

Die in den vorangegangenen Unterkapiteln vorgestellten Kenngrößen für Glas, Fenster und Fassaden finden Eingang in die Gesamtbilanzierung eines Gebäudes, die vom Planer erstellt werden muss. Auf Basis dieser Planung werden die erforderlichen Bauteilkennwerte in der Ausschreibung vorgegeben.

Gemäß EnEV gibt es in Deutschland für den Neubau von Wohngebäuden keine Einzelanforderungen an die unterschiedlichen Bauteile der thermischen Gebäudehülle. Nach den Vorgaben der Energieeinsparverordnung muss je nach Gebäudetyp für die gesamte wärmeübertragende Gebäudehülle ein bestimmter Höchstwert der Transmissionswärmeverlust H'_T eingehalten werden.

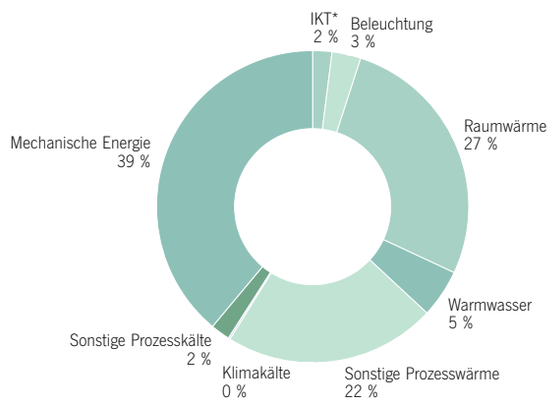
Bei Sanierung oder Erweiterung von Gebäuden sind für Bauteile Grenzwerte festgelegt, die nicht überschritten werden dürfen.

Die Normenreihe DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ beschreibt im Detail die Anforderungen an den Wärmeschutz für Gebäude. Sie trifft Festlegungen für den winterlichen und den sommerlichen Wärmeschutz, die auch den Feuchteschutz und ein Lüftungskonzept beinhalten. Mittelfristig wird sie durch die neue Normenreihe DIN V 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“ abgelöst werden (Stand 2017). Die DIN V 18599 befasst sich mit der kompletten Energiebilanz von Gebäuden. Sie erlaubt die Beurteilung aller Energiemengen, die zur Heizung, Kühlung, Warmwasserbereitung, raumlufttechnischen Konditionierung und Beleuchtung von Gebäuden notwendig sind. Dabei berücksichtigt die Norm auch die gegenseitige Beeinflussung von Energieströmen aus Gebäude- und Anlagentechnik. Die Norm gilt für die Beurteilung der Gesamt-Energieeffizienz für Wohn- und Nichtwohngebäude, bei Neubau und im Bestand.

„Fordern und fördern“ – unter diesem Motto gibt es zusätzlich zu den Forderungen der EPBD – Richtlinie für energiesparendes Bauen in den EU-Mitgliedsländern auch Förderung. Teilweise geschieht dies durch steuerliche Anreize, teilweise werden günstige Finanzierungsbedingungen und Zuschüsse angeboten, wie z. B. in Deutschland mit den KfW-Programmen für die deutliche Unterschreitung der jeweils gültigen EnEV-Mindestanforderungen.

40 % der Endenergie wird in der EU in Gebäuden verbraucht, und ca. 75 % des Gebäudebestands sind alles andere als energieeffizient gebaut. Je nach Mitgliedsland werden jedoch pro Jahr nur 0,4 bis 1,2 Prozent dieses Bestandes saniert. Deshalb arbeitet die Europäische Kommission an einer Erweiterung der EPBD-Richtlinie, mit dem Hauptziel, die Sanierungsraten deutlich zu erhöhen und so genannte smarte Technologien für eine effiziente Gebäudenutzung zu fördern (Stand 2017).

Wie die Darstellung des Energieverbrauchs nach Anwendungsgebieten in Deutschland für das Jahr 2015 zeigt, werden vom gesamten Verbrauch ca. 27 % für die Erzeugung von Raumwärme verwendet:



*Stromverbrauch für Informations- und Kommunikationstechnologien
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Im Klimaschutzplan 2050, den die deutsche Bundesregierung im November 2016 beschlossen hat, werden die von der EPBD-Richtlinie bis 2030 gesteckten Ziele bis in das Jahr 2050 fortgeschrieben. Der Plan soll für alle Handlungsfelder inhaltliche Orientierung geben, damit langfristig für Deutschland bis 2050 weitgehende Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. Dafür müssen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 bis zum Zwischenziel 2030 um mindestens 55 % und bis 2050 um 80 bis 95 % reduziert werden.

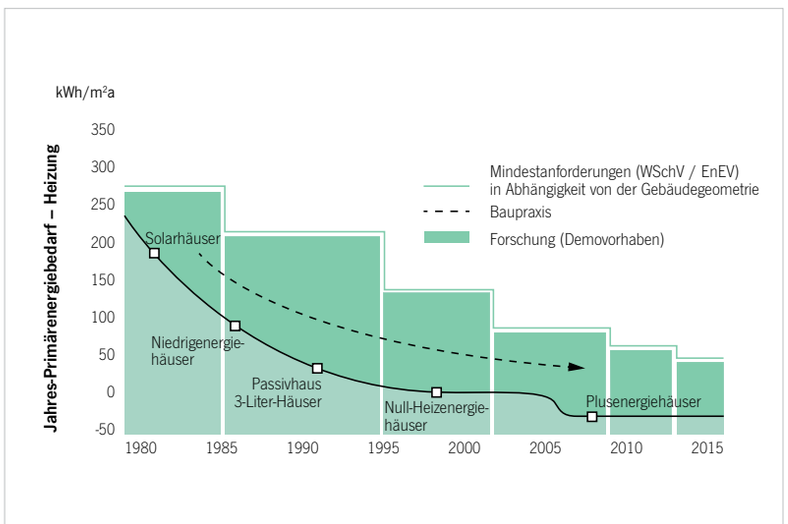
Derzeit liegen die Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland jedoch noch über dem EU-Durchschnitt bzw. deutlich über dem weltweiten Durchschnitt. Im Gebäudebereich wird ein Fahrplan für einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand vorgegeben. Zentral ist dabei die schrittweise Weiterentwicklung der energetischen Standards für Neubau und Bestand bei umfangreichen Sanierungen. Darüber hinaus sollen vor allem Heizsysteme gefördert werden, die auf erneuerbaren Energien beruhen.

3.5.3 Entwicklung des energiesparenden Bauens

Unter dem Schock der ersten Ölkrise von 1973 entstand in der Bundesrepublik Deutschland die erste Wärmeschutzverordnung (WSchutzVO), die 1977 in Kraft trat. Nach der zweiten Ölkrise im Jahr 1979 wurde das Dämmniveau durch eine 2. (1982) und dann eine 3. Wärmeschutzverordnung (1995) verschärft. Mit der ersten Energieeinsparverordnung (EnEV) wurden 2002 erstmals bauliche und heizungstechnische Anforderungen an Gebäude – sowohl für Bestand als auch für Neubau – gemeinsam betrachtet. Die beiden bisher getrennten Verordnungen Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung wurden in der EnEV 2002 zusammengeführt. Seit da werden die Anforderungen in vielen Stufen stetig verschärft – eine Entwicklung, die bis heute anhält (siehe Kapitel 3.5.2 Anforderungen für Neubau und Bestand).

Es liegt in der Natur der Dinge, dass mit der zunehmend genaueren Betrachtung der Zusammenhänge auch die Komplexität zunimmt. Die Planung von energieeffizienten komfortablen Gebäuden ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die Fachwissen auf vielen Gebieten erfordert.

3.5.4 Entwicklung des energieeffizienten Bauens in Deutschland am Beispiel von Wohngebäuden



In Anlehnung an Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Getrieben durch die gesetzlichen Anforderungen entwickelten sich immer neue Baustandards, oftmals auch mit dem Ziel, die Mindestanforderungen deutlich zu unterschreiten.

Das **Niedrigenergiehaus** wurde mit der Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV) als Baustandard für Neubauten eingeführt. In Abhängigkeit vom Kompaktheitsgrad (A/V-Verhältnis) wurden der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T des Gebäudes und der Primärenergiebedarf begrenzt, was zu einem Jahresheizwärmebdarf von 75 bis 35 kWh/m²a führte.

Üblicherweise wird der Jahresheizwärmebedarf in Kilowattstunden pro m² und Jahr angegeben. Dabei entsprechen 1 kWh/m²a ungefähr einem Heizöläquivalent von 0,1 l/m²a bzw. einem Erdgasäquivalent von ca. 10,7 m³/m²a.

Hieraus entstand am Fraunhofer-Institut für Bauphysik der Begriff **3-Liter-Haus**, aus der Umrechnung des Energiebedarfs eines sehr guten Niedrigenergiehauses von 30 kWh/m²a in die durch den Vergleich mit Fahrzeugen anschauliche Angabe 3 Liter pro m² und Jahr.

Der Baustandard **Passivhaus** befasst sich nicht nur mit der weiteren Senkung des Energieverbrauchs, sondern stellt ein schlüssiges Gesamtkonzept dar. Die Definition lautet: „Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in dem die thermische Behaglichkeit (ISO 7730) allein durch Nachheizen oder Nachkühlen des Frischluftvolumenstroms, der für ausreichende Luftqualität (DIN 1946) erforderlich ist, gewährleistet werden kann – ohne dazu zusätzlich Umluft zu verwenden.“ Die Häuser werden „passiv“ genannt, weil der überwiegende Teil des Wärmebedarfs aus „passiven“ Quellen wie Sonneneinstrahlung sowie der Abwärme von Personen und technischen Geräten gedeckt wird. Der verbleibende Jahresheizwärmebedarf liegt bei ≤ 15 kWh/m² (1,5-Liter-Haus). Das ist nur möglich, wenn die Wärmeverluste durch eine exzellent gedämmte Gebäudehülle äußerst gering sind. Durch diesen Baustandard wurde bereits in den späten 1990-Jahren die Weiterentwicklung von Fenstersystemen mit hochwärmedämmenden Rahmenprofilen und Dreifach-Verglasungen zu U_W-Werten unter 0,8 W/m²K angestoßen. Der Baustandard Passivhaus ist nicht auf einen bestimmten Gebäudetyp beschränkt. Er kann auch durch energetische Gebäudesanierung erreicht werden.

Das **Niedrigstenergiehaus**, das gemäß der EPBD-Richtlinie ab 2021 EU-weit zum Standard für Neubau werden soll, wird auch als Fast-Null-Energiehaus bezeichnet. Dabei handelt es sich um ein Gebäude, das eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf soll zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden. Die einzelnen Mitgliedsländer sind selbst dafür zuständig, die Mindestanforderungen für diesen Baustandard unter Berücksichtigung ihrer klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Kosteneffizienz zu definieren. Es ist anzunehmen, dass der Energiebedarf eines Niedrigstenergiehauses in Deutschland irgendwo zwischen Passivhaus und Null-Heizenergiehaus liegen wird.

Der Energiestandard **Nullenergiehaus** ist erreicht, wenn der externe Energiebezug des Gebäudes im Jahresmittel durch eigene Energieerzeugung (z. B. durch Solaranlagen etc.) aufgewogen ist. Neben der passiven Wärmerückgewinnung, über die auch schon das Passivhaus verfügt, kommen solartechnischen Anlagen für die Warmwasser- und Stromgewinnung hinzu, die die externen Energielieferungen kompensieren. Wird mehr Energie erzeugt als das Haus selbst verbraucht, wird die Energiebilanz positiv, die überschüssige Energie kann beim **Plusenergiehaus** ins Netz eingespeist werden. Bezieht das Gebäude gar keine externe Energie mehr, sondern versorgt sich komplett selbst, ist es energieautark.

Alle Gebäudekonzepte zum energiesparenden Bauen haben ab dem 3-Liter-Haus bzw. Passivhaus hochwärmedämmende Fenster mit Dreifach-Isolierglas und wärmetechnisch verbessertem Randverbund als Gemeinsamkeit.

3.5.5 Energiesparendes Bauen und Glas

Kaum ein Baustoff kann eine so rasante und positive Entwicklung vorweisen wie Glas. Hatte die Einfachglasscheibe noch einen U_g-Wert von 5,8 W/m² K und damit kaum dämmende Wirkung, wurde mit der Erfindung des hermetisch versiegelten Mehrscheiben-Isolierglases im Jahr 1959 das luftgefüllte unbeschichtete Zweifach-Isolierglas bis in die Neunziger Jahre zum Standardprodukt. Durch diese ersten Isoliergläser ging zwar nur noch etwa halb so viel Energie verloren wie durch Einfachscheiben, jedoch war ihre Wärmedämmung aus heutiger Sicht mit U_g = 3,0 W/m²K noch vergleichsweise bescheiden. Obwohl mit der Entwicklung der Glasbeschichtungen auch schon vorher verbesserte Produkte verfügbar waren, brachte erst die 3. Wärmeschutzverordnung im Jahr 1995 den entscheidenden Durchbruch. Der Siegeszug der beschichteten gasgefüllten Mehrscheiben-Isoliergläser begann. In der heute üblichen Dreischeiben-Ausführung erreichen moderne Verglasungen problemlos U_g-Werte von 0,7 bis 0,5 W/m²K. Ohne diese Dämmleistung der transparenten Flächen wäre energiesparendes Bauen schlichtweg nicht möglich. Im Verlauf weniger Jahrzehnte wurde der U_g-Wert von Verglasungen um eine ganze Zehnerpotenz, d. h. auf weniger als ein Zehntel des Wertes von Einfachglas minimiert.

Bei der energetischen Betrachtung von Gebäuden kommt den verglasten Flächen immer eine besondere Bedeutung zu. Anders als bei nichttransparenten Bauteilen geht durch Fenster und Fassaden nicht nur Heizwärme verloren, sondern durch solare Gewinne tragen die verglasten Flächen wesentlich zu einer positiven Energiebilanz bei. Je nach Qualität und Orientierung werden die Glasscheiben zum Netto-Energielieferanten, indem sie die kostenlose Sonnenenergie in Gebäude hineinlassen. Deshalb kann ein hoher Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasungen den Jahresprimärenergiebedarf beachtlich reduzieren. Mauerwerk kann das nicht.

Wärmeverluste im Winter werden mit den richtigen Gläsern ebenso vermieden wie Überhitzung im Sommer. Außerdem holen transparente Flächen kostenloses Tageslicht bis tief in Räume hinein und sparen so auch noch Energie für künstliche Beleuchtung. Glas stellt den Bezug zwischen Innen- und Außenwelt her und ist für die Atmosphäre in Räumen und das Wohlbefinden der Nutzer von Gebäuden von entscheidender Bedeutung. Mit seinen vielen positiven Eigenschaften sorgt Glas für mehr Behaglichkeit und Wohnkomfort und beeinflusst so maßgeblich die Nutzungsqualität von Gebäuden.

Der seit Jahren anhaltende Trend zu immer größeren Glasanteilen für helle, lichtdurchflutete Gebäude lässt sich jedoch nur dann fortschreiben, wenn diese verglasten Flächen entsprechend hochwärmedämmend ausgeführt sind und gleichzeitig mit intelligenten Maßnahmen eine sommerliche Überhitzung vermieden wird. Damit multifunktionelle Gläser mit Fenster- und Fassadentechnik, Automation, Lüftungs- und Klimatechnik intelligent zusammenwirken können, müssen ihre Kenndaten optimal auf das geplante Gebäude abgestimmt werden. Deshalb werden nicht nur die Anforderungen an die Gläser, sondern auch an das Fachwissen und die planerische Kompetenz für das Auslegen von transparenten Flächen weiter steigen.

Glas spielt als multifunktionales Bauteil für Gebäude eine enorm wichtige Rolle für

- Wärmedämmung
- Energiegewinnung
- Sonnenschutz
- Lärmschutz
- Tageslichtnutzung
- Gestaltung und Ästhetik

Für energiesparendes Bauen müssen die bereits vorhandenen technischen Möglichkeiten wie hochdämmende Dreifach-Isoliergläser mit wärmetechnisch verbessertem Randverbund, ausgerüstet als Multifunktionsgläser für die verschiedensten Anforderungen, verstärkten Einsatz finden. Darüber hinaus kann im Fassadenbereich durch Zweischaligkeit die Schutzwirkung von Glas in optimaler Weise genutzt und weiter verbesserte Wärmedämmung, zusätzlicher Schallschutz und Raum für Beschattungssysteme geschaffen werden.

Je nach Wunsch ermöglicht Glas Ausblicke oder Einblicke. Glas stellt die Verbindung zur Außenwelt her und trennt uns gleichzeitig von den Einflüssen der Witterung. Glas ermöglicht auch für das energiesparende Bauen großartige Aussichten!