

Thermische Gebäudesimulation nach DIN 4108-2:2012

zum Nachweis des Sommerlichen Wärmeschutzes

In der EnEV 2014 wird der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes sowohl für neu zu errichtende Wohngebäude (§ 3 Absatz 4) als auch für Nichtwohngebäude (§ 4 Absatz 4) gefordert. In den Anlagen 1 und 2 werden die hierfür anzuwendenden Verfahren genannt, nämlich das Verfahren mit Sonneneintragskennwerten oder alternativ eine thermische Gebäudesimulation mit dem Ziel der Begrenzung der jährlich auftretenden Übertemperaturgradstunden. Grenzwerte und diverse Randbedingungen für die Berechnung werden von der DIN 4108-2:2013 genannt.

Nutzen einer thermischen Simulation

Insbesondere durch die Energieeinsparverordnungen der letzten Jahre wurde der Sommerliche Wärmeschutz von Gebäuden unter besondere Beobachtung gestellt. Die Forderungen der EnEV und der DIN 4108-2 sind mittlerweile so streng, dass teure, oft auch unschöne, konstruktive Maßnahmen zum Sommerlichen Wärmeschutz erforderlich werden und spezielle, architektonische Lösungen (z.B. Fassaden mit hohem Glasanteil) ohne technische Kühlung nicht mehr möglich sind.

Das Standardverfahren zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes (Sonneneintragskennwertverfahren) geht nicht sehr spezifisch auf die unterschiedlichen Bauweisen ein und enthält viele Sicherheiten. Die Anforderungen wurden mit der neuen DIN 4108-2 bis zur „nicht Anwendbarkeit“ verschärft.

Vor diesem Hintergrund ist der Nachweis über die Begrenzung der Übertemperaturgradstunden, der mit einer thermischen Gebäudesimulation berechnet werden können, eine interessante Alternative. Eine thermische Gebäudesimulation kann dazu führen, dass dem Bauherrn manche Investition für den Sommerlichen Wärmeschutz erspart bleibt. Sie kann architektonische Lösungen möglich machen, die mit dem gängigen Verfahren nicht nachgewiesen werden könnten.

Die neuen, rechnergestützten Verfahren bieten den Ingenieurinnen und Ingenieuren Möglichkeiten, Planungsaufgaben und Begutachtungen näher an die Realität heranzuführen und schonender mit den Ressourcen umzugehen. Solche Möglichkeiten müssen zum Nutzen aller Beteiligten aufgegriffen werden. Ein verantwortungsvoller Umgang mit dem Einsatz von Software ist allerdings notwendig und eine neue Qualität des Ingenieurberufs. DIN 4108-2:2013 sagt dazu unter anderem: „Insbesondere aufgrund der Vielzahl der bei dynamisch-thermischen Simulationsrechnungen zu berücksichtigenden Einflüsse ist der Ansatz der ... vorgegebenen einheitlichen Berechnungsrandbedingungen wesentliche Voraussetzung für die Nachweisführung.“

Hilfreiche Normen

DIN 4108-2:2013 Abs.8.4	„Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Abschnitt 8.4 „Anforderungen und Randbedingungen für thermische Gebäudesimulationen“ Die Norm definiert Grenzwerte für die jährlich akzeptierten Übertemperaturgradstunden und die wichtigsten Randbedingungen für die thermische Simulation, wie Nutzungszeiten, Außenklimabedingungen nach Klimaregionen, Ansatz für interne Wärmelasten, Luftwechselzahlen, erhöhter Tag- / Nachtluftwechsel, Verschattungseinflüsse. Weitere Details oder eine Norm, nach der simuliert werden soll, sind nicht genannt.
EN ISO 13791:2012	„Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012)“ Die Norm enthält Details zum Berechnungsverfahren (die im folgenden näher beschrieben werden) und die Validierungsbeispiele.
EN 15255:2007	„Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren“ Ähnlich EN ISO 13791 mit Augenmerk auf die Raumkühllasten.
EN 15265:2007	„Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren“ Ähnlich EN 15255.“

Operative Raum(über)temperatur

Mit dem Verfahren der thermischen Gebäudesimulation wird die Temperaturentwicklung in einem Raum oder Gebäude unter Beachtung der äußeren Umstände im zeitlichen Verlauf simuliert.

Eine Übertemperaturgradstunde entsteht, wenn die operative Raumtemperatur für die Dauer von einer Stunde genau 1°K über der höchstzulässigen Raumtemperatur liegt. Eine Temperaturüberschreitung von 2°K würde stündlich 2 Kh verursachen. Die akzeptierten Grenzwerte aus DIN 4108:2013 sind für Wohngebäude 1200 Kh/Jahr und für Nichtwohngebäude 500 Kh/Jahr. Die thermische Simulation muss also für ein ganzes Jahr erfolgen, was einen erheblichen Berechnungsaufwand zur Folge hat.

Man kann aber kürzere Referenzzeiträume wählen und erst, wenn es absehbar knapp wird, den Berechnungszeitraum ausweiten.

Die Grenzwerte für die operative Raumtemperatur sind in Abhängigkeit von der gewählten Klimaregion mit 25°C , 26°C oder 27°C festgelegt (4108-2, Tab.9). Man berücksichtigt damit die Gewöhnung der Nutzer an unterschiedlich warme Regionen.

Die operative Raumtemperatur wird von EN ISO 13791 als geometrisches Mittel aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur der inneren Bauteiloberflächen definiert (gefühlte Temperatur). Die Lufttemperatur ändert sich infolge Konvektion an den Bauteiloberflächen, internen Wärmegewinnen (konvektiver Anteil) und direkter Solarstrahlung (Absorption der Einrichtungsgegenstände). Die Temperaturen der Bauteiloberflächen sind vom Wärmedurchgang durch die Bauteile von direkter oder reflektierter Solarstrahlung und von der langwelligigen Wärmestrahlung im Raum bestimmt.

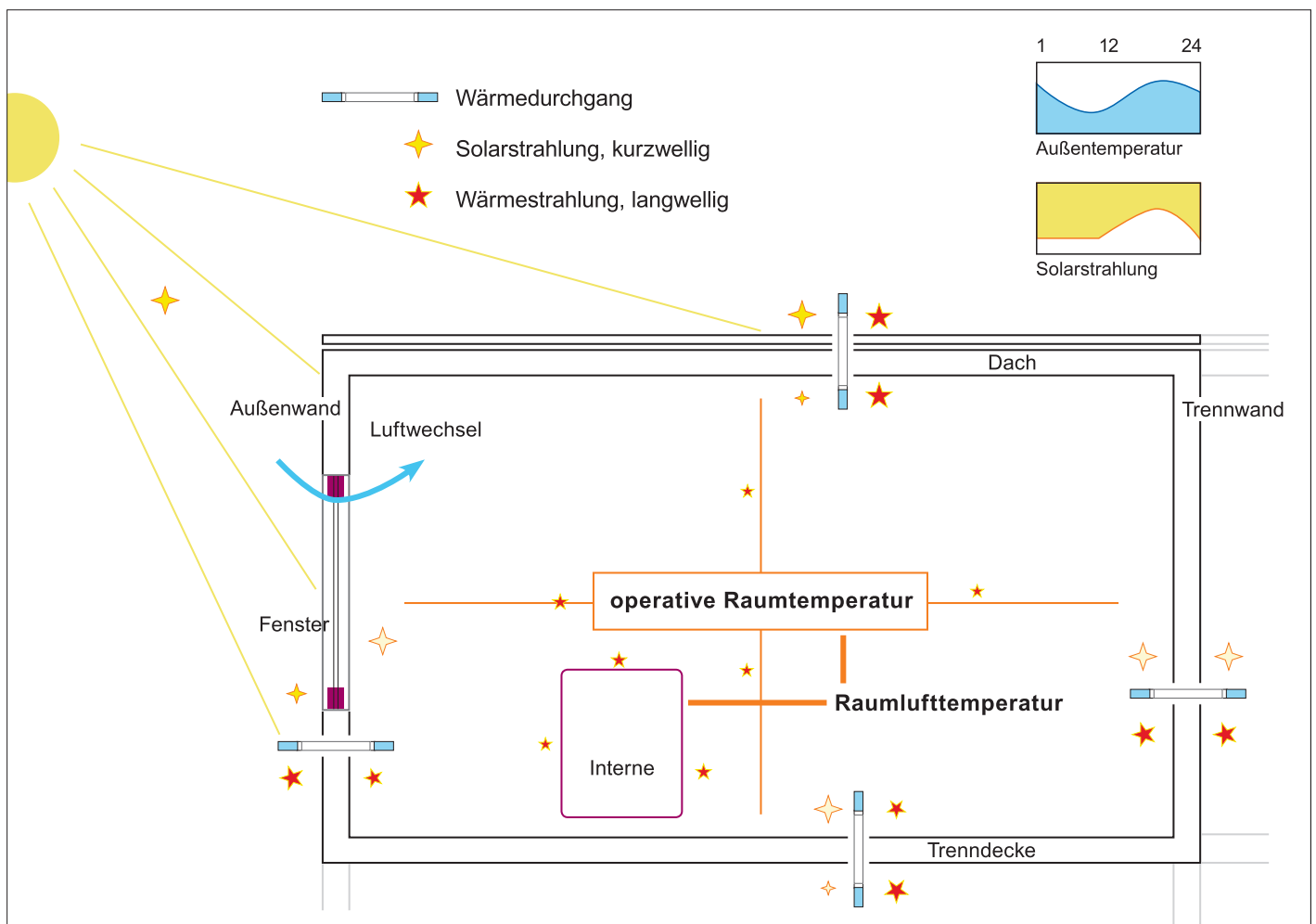
Wärmedurchgang durch die Raumphülle

Der Wärmedurchgang durch die raumumschließenden Bauteilkonstruktionen (siehe Grafik) wird von der Konvektion und der Wärmestrahlung an den Bauteiloberflächen sowie dem Wärmedurchgangswiderstand und der Masse der Bauteile bestimmt.

Der Wärmeübergang zwischen Bauteiloberfläche und Außen- / Innenumgebung infolge Konvektion wird mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (h_c) berechnet, der an Außenflächen von der Windgeschwindigkeit (Regelwert $4 + 4 \cdot \text{Windgeschwindigkeit} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und an Innenflächen von der Wärmestromrichtung (horizontal $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, nach oben $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und nach unten $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) abhängt.

Für Fußböden und Decken wird mit unterschiedlichen h_c -Werten gerechnet, je nachdem, in welche Richtung die Wärme gerade fließt. Den konvektiven Wärmestrom erhält man als Produkt aus h_c -Wert und Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und Umgebungsluft. Die Temperatur der Umgebungsluft ist bei Außenbauteilen witterungsbedingt variabel, bei Innenbauteilen nimmt man zu beiden Seiten der trennenden Bauteile gleiche Bedingungen an (vergleichbarer Nachbarraum). In Außenbauteilen findet man also immer eine Wärmewelle mit unterschiedlicher Amplitude, Innenbauteile erwärmen sich demgegenüber symmetrisch.

Im Inneren des Bauteils verzögert ein geringer Wärmedurchgang (guter U-Wert) in Kombination mit Masse (hohes Gewicht) die Erwärmung erheblich. Leichte Bauteile (wie z.B. leichte Trennwände) erwärmen sich unabhängig von Ihrem Dämmwert schnell. Massive Außenbauteile aus Beton oder Mauerwerk mit Außendämmung (Thermohaut, Dachdämmung) erwärmen sich dagegen langsam, kühlen dann aber auch nur langsam wieder aus.



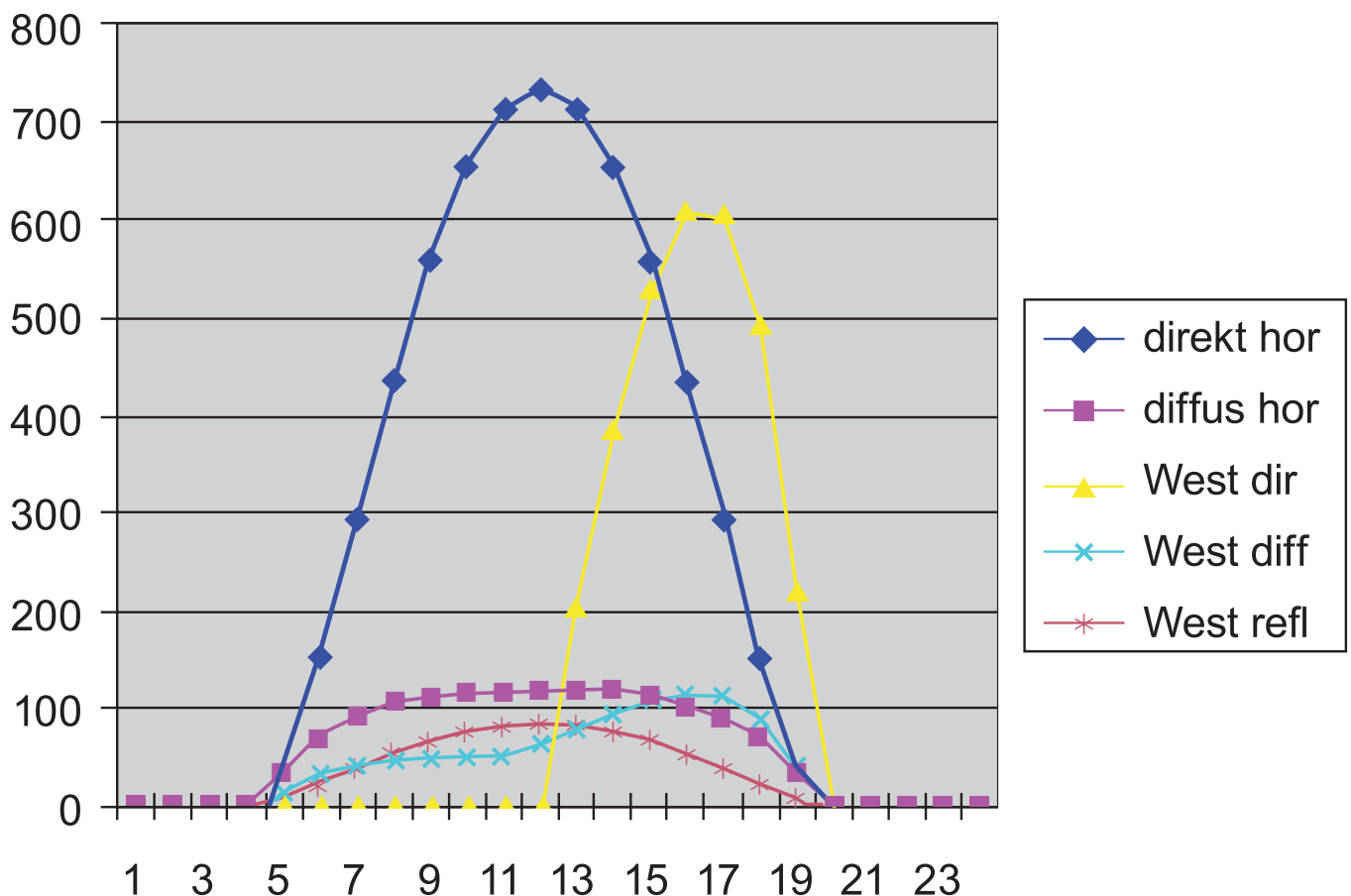
Schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge in einem Raum und an seinen raumbegrenzenden Hüllflächen zur Außenumgebung bzw. zu benachbarten Räumen.

Einfluss der Solarstrahlung (kurzwellig)

Solarstrahlung (gelbe Sternchen in der Grafik) setzt sich aus direkter und diffuser (indirekter, an Wolken und der Umgebung reflektierter) Strahlung zusammen. Der Wärmestrom infolge Solarstrahlung nimmt immer positive Werte an, was einem Wärmegewinn bzw. einer Wärmelast entspricht. Die kurzwellige Strahlung dringt einerseits durch transparente Außenbauteile (Fenster) in den Raum ein. Ein kleiner Anteil (etwa 10%, je nach Mobiliar) erwärmt die Raumluft direkt, beinahe der ganze Rest erwärmt die Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile (in der Regel zu 50% den Fußboden, zu 40% die Wände und zu 10% die Decke). Ein geringer Anteil kann auch durch die Fenster zurück gestrahlt werden (solarer Verlustfaktor nach außen). Die direkte und diffuse Solarstrahlung durch Fenster kann mit Verschattungseinrichtungen reduziert werden. Der Reduktionsfaktor wird mit „g-Wert der Verglasung * Fc-Wert der Sonnenschutzvorrichtung“ berechnet und kann Werte $\leq 0,2$ (80% Reduktion) annehmen.

Davon abgesehen erwärmt direkte und diffuse Solarstrahlung aber auch die äußeren, opaken Bauteiloberflächen (insbesondere die meist dunklen Dachflächen) und dringt dann über die Bauteile ins Rauminnere vor. Die „solaren Gewinne“ opaker Außenbauteile können nur durch bauliche Verschattung oder helle, reflektierende Oberflächen (geringer Absorptionsgrad für Solarstrahlung) reduziert werden.

Dachflächen sind meist ganztägig der Solarstrahlung ausgesetzt und erhalten die volle Strahlungsdosis. Die Einstrahlung auf Wandflächen ist orientierungsabhängig, Fassaden nach Osten sind morgens besonnt, Westfassaden nachmittags und abends.



Solarstrahlung nach EN ISO 13791 für 52° Nord (Berlin), Direkt- und Diffusstrahlung in $[W/m^2]$ auf eine horizontale (Dach) Fläche, Direkt- und Diffusstrahlung auf eine westorientierte, vertikale (Wand) Fläche im Tagesverlauf (Sommerstag). Für die Validierung wird das Tagesklima bis zu Temperaturkonstanz wiederholt.

Wärmeverteilung durch Wärmestrahlung (langwellig)

Die langwellige Wärmestrahlung (rote Sternchen in der Grafik) verlangt besondere Beachtung, da sie die Wärmeverteilung entscheidend beeinflusst. Wärmestrahlung tritt praktisch überall auf, an den Bauteilaußenflächen, zwischen den Bauteiloberflächen im Rauminnen, zwischen Bauteiloberflächen und inneren Wärmequellen (z.B. Beleuchtung) und zwischen Bauteiloberflächen und Raumnutzern.

Die äußeren Bauteiloberflächen tauschen sich mit ihrer Umgebung über den Koeffizienten für Wärmestrahlung „hr“ aus, der meist mit $5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen wird, Wärmestromdichte = „hr * Temperaturdifferenz“, wobei die Temperatur der Umgebung mit der zeitabhängigen Außenlufttemperatur gleichgesetzt wird. Der Kehrwert der Summe der Übergangskoeffizienten für Konvektion und Wärmestrahlung ergibt den Wärmeübergangswiderstand, der aus den U-Wert-Berechnungen bekannt ist.

Man kann bei Dächern und Außenwänden zusätzliche eine Korrektur für die Wärmeabstrahlung zum Himmel berücksichtigen, Regelwert für Dächer ca. $70 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dieser Einfluss wird bei den Validierungsberechnungen nach EN ISO 13791 vernachlässigt.

Da die Wärmestrahlung zwischen temperierten Oberflächen im Rauminnen zur 4. Potenz der absoluten Temperaturen (Oberflächentemperatur + $273,15 \text{ °C}$, Stefan-Boltzmann-Gesetz) proportional ist und weil innere Oberflächen mehrere Strahlungspartner haben, ist der Berechnungsaufwand für die langwellige Wärmestrahlung im Raum erheblich. Anhang E der EN ISO 13791 enthält daher ein Näherungsverfahren, das mit (nur) einem fiktiven Strahlungspartner für jede Oberfläche auskommt. Die Größe und Temperatur des fiktiven Strahlungspartners werden als Summe bzw. Mittelwert aller Bauteiloberflächen zum Zeitpunkt t bestimmt.

Für den Strahlungsanteil aus internen Wärmequellen wird die Wärmestrahlung auf jede Bauteiloberfläche um den Wert „interne Gewinne * Strahlungsanteil / Summe der inneren Bauteiloberflächen“ erhöht.

Wärmestrahlung infolge interner Wärmequellen ist immer positiv.

Helfer in der Not: Luftaustausch

Der Luftaustausch im Raum ist der entscheidende, nutzerbestimmte Helfer bei der Regulierung der Raumtemperatur. In überhitzten Räumen kann insbesondere der Luftaustausch in den kühleren Nachtstunden die Raumluft und die Bauteile abkühlen und überschüssige Wärme reduzieren (Ablüften).

Taglüftung ist sinnvoll, solange die Raumtemperatur über der Außenlufttemperatur liegt. Berechnen kann man den Effekt im Prinzip über zwei unterschiedlich temperierte Raumluftvolumen.

DIN 4108-2 gibt die Luftwechselzahlen vor, mit denen gerechnet werden darf. Bei Wohnnutzung ist das ein Basiswert von 0,5 Luftwechseln / Stunde, der während der Nutzungszeit und bei Raumtemperaturen $> 23 \text{ °C}$ auf 3 Luftwechsel / Stunde und in der Nichtnutzungszeit (Nacht) auf 2 Luftwechsel, falls eine geschossübergreifende Lüftungsmöglichkeit besteht gar auf 5 Luftwechsel / Stunde erhöht werden darf.

Bei Nichtwohngebäuden ist während der Nutzungszeit von einem grundflächen- und volumenabhängigen Luftwechsel auszugehen, außerhalb der Nutzungszeit von 0,24 Luftwechseln / Stunden, was der Infiltration bei geschlossenen Fenstern entspricht. Die Werte für erhöhte Luftwechsel dürfen analog den Wohngebäuden angenommen werden, wenn entsprechende (mechanische) Lüftungsmöglichkeiten vorhanden sind.

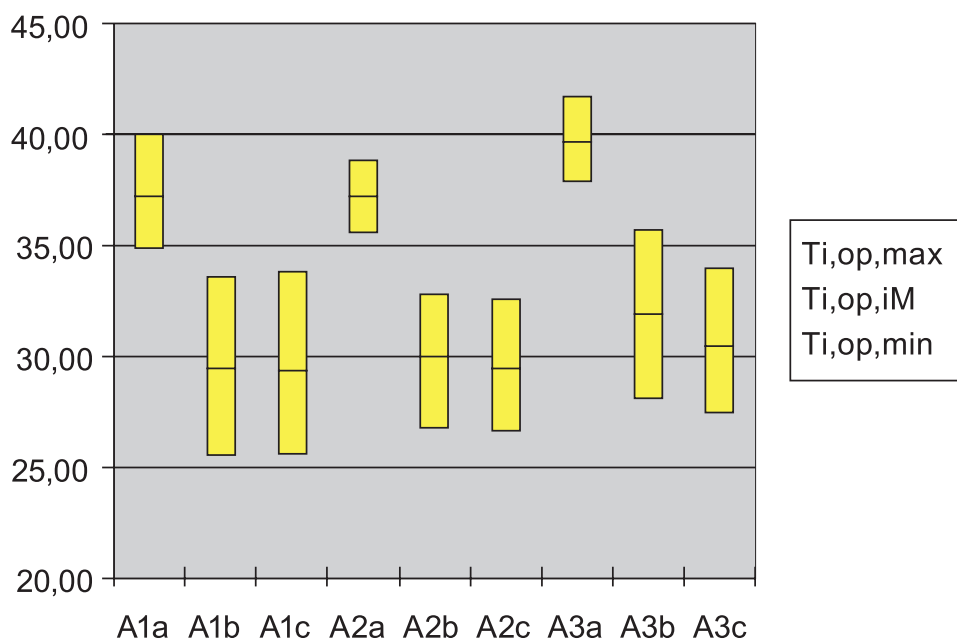
Lehren aus den Validierungsbeispielen

Die Validierungsbeispiele nach EN ISO 13791 werden für einen etwa 20 m^2 großen Raum mit einer Außenwand nach Westen durchgeführt.

Im Fall A rechnet man mit einem südeuropäischen Außenklima (40. Breitengrad, etwa Höhe Madrid) mit Außentemperaturen zwischen 22 °C in der Nacht und bis 34 °C am Tag sowie einer kleinen, einfach verglasten Fensterfläche. Das sonnige Tagesklima wird als konstant angesetzt und täglich wiederholt. Die thermische Simulation wird bis zur Temperaturkonstanz im Raum durchgeführt. Dabei erhält man die folgenden Ergebnisse:

Fall	Konstruktion	Luftwechsel	Ti,op,max	Ti,op,iM	Ti,op,min
A1a	abgehängte Akustikdecke nach oben und unten	konstant 1 h ⁻¹	40,00	37,18	34,80
A1b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	33,60	29,47	25,50
A1c		konstant 10 h ⁻¹	33,80	29,33	25,60
A2a	Stb-Decke nach oben und unten	konstant 1 h ⁻¹	33,80	37,15	35,60
A2b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	32,80	30,00	26,80
A2c		konstant 10 h ⁻¹	32,60	29,40	26,60
A3a	Stb-Dachdecke und Stb-Decke nach unten	konstant 1 h ⁻¹	41,70	39,65	37,90
A3b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	35,70	31,96	28,10
A3c		konstant 10 h ⁻¹	34,00	30,48	27

Ti,op,iM = Mittelwerte der operativen Raumtemperatur, max / min = Maximal- / Minimalwerte; höchste erreichte Stundentemperatur = 41,7 °C, Konstruktion A3a um 19:00 Uhr.

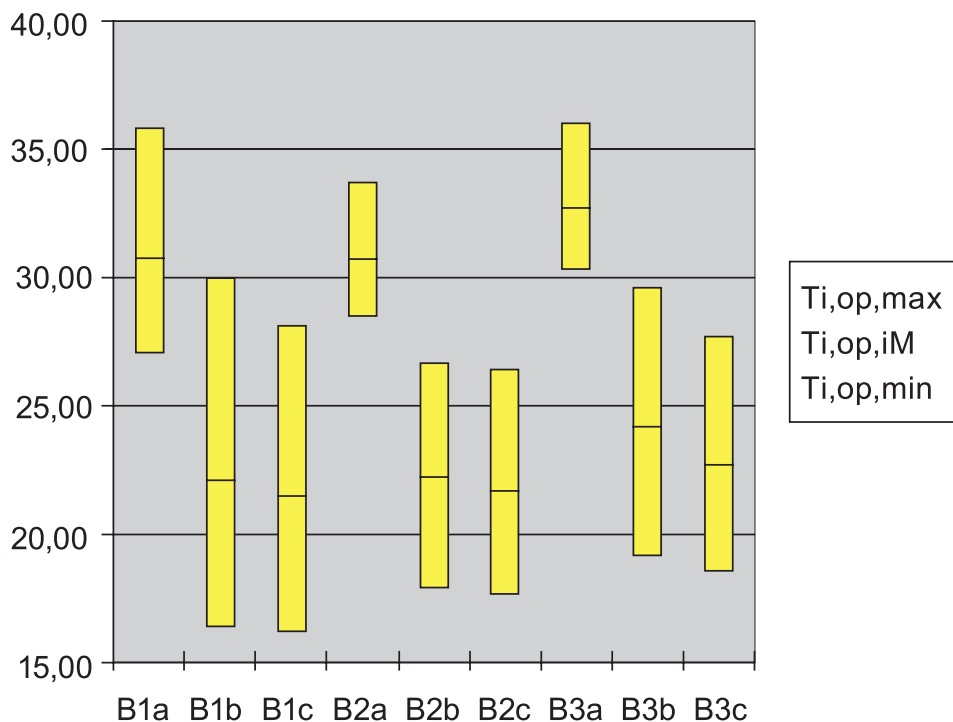


Minimale, mittlere und maximale, operative Raumtemperatur [°C] für die Prüffälle A1a bis A3c aus EN ISO 13791:2012. Konstantes, südeuropäisches Klima, Varianten 1 mit abgehängten Decken, Varianten 2 mit Stb-Decken, Varianten 3 mit Stb-Dachdecke. Varianten a jeweils mit geringem Luftwechsel 1 h⁻¹, Varianten b mit hohem Nachtluftwechsel, Varianten c mit durchgehend hohem Luftwechsel 10 h⁻¹.

Im Fall B rechnet man mit einem nordeuropäischen Außenklima (52. Breitengrad, etwa Höhe Berlin) mit Außentemperaturen zwischen 12 °C in der Nacht und bis 28 °C am Tag sowie einer großen, zweifach verglasten Fensterfläche. Dabei erhält man die folgenden Ergebnisse:

Fall	Konstruktion	Luftwechsel	Ti,op,max	Ti,op,iM	Ti,op,min
B1a	abgehängte Akustikdecke nach oben und unten	konstant 1 h ⁻¹	35,80	30,72	27,10
B1b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	29,90	22,08	16,40
B1c		konstant 10 h ⁻¹	28,10	21,47	16,20
B2a	Stb-Decke nach oben und unten	konstant 1 h ⁻¹	33,70	30,76	28,50
B2b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	26,70	22,23	17,90
B2c		konstant 10 h ⁻¹	26,40	21,66	17,70
B3a	Stb-Dachdecke und Stb-Decke nach unten	konstant 1 h ⁻¹	36,00	32,70	30,30
B3b		tags 0,5, nachts 10 h ⁻¹	29,60	24,15	19,20
B3c		konstant 10 h ⁻¹	27,70	22,73	18,60

Ti,op,iM = Mittelwerte der operativen Raumtemperatur, max / min = Maximal- / Minimalwerte; höchste erreichte Stundentemperatur = 36,0 °C, Konstruktion B3a um 19:00 Uhr.



Minimale, mittlere und maximale, operative Raumtemperatur [°C] für die Prüffälle B1a bis B3c aus EN ISO 13791:2012. Konstantes, nordeuropäisches Klima, Varianten 1 mit abgehängten Decken, Varianten 2 mit Stb-Decken, Varianten 3 mit Stb-Dachdecke. Varianten a jeweils mit geringem Luftwechsel 1 h⁻¹, Varianten b mit hohem Nachtluftwechsel, Varianten c mit durchgehend hohem Luftwechsel 10 h⁻¹.

Im Vergleich der Varianten A und B fällt auf, dass sich die Tagesmittelwerte der operativen Raumtemperaturen wegen der unterschiedlichen Klimabedingungen um mehr als 5 °C unterscheiden. Die Temperaturamplituden im Fall B sind größer, was mit der größeren Fensterfläche zusammen hängen könnte. Das Muster der unterschiedlichen Bauweisen und Lüftungstechniken ist ähnlich. In beiden Fällen hat die Lüftung den größten Einfluss. Zusätzliche Speichermassen (Fälle b und c) reduzieren die Temperaturamplitude und verringern die Temperaturspitzen, allerdings bei relativ ähnlichen Tagesmitteltemperaturen. Hohe Taglüftung (Fall c) lohnt sich insbesondere im Fall c, Prüffall mit Stb-Dachdecke.

Anwendungshinweise

Die Validierungsbeispiele aus EN ISO 13791 sind geeignet, um die Funktionen der Softwareprogramme im Zusammenhang zu prüfen und abzugleichen. Wie beschrieben, wird dazu ein Tagesklima definiert und wiederholt angewendet, bis sich ein gleichbleibender Temperaturverlauf über 24 Stunden einstellt. Je nach Berechnungsfall muss dazu zwischen 4 und 40 Tage lang gerechnet werden. Bei einem Zeitintervall von 60 Sekunden je Iterationsschritt kommt man auf 1440 Rechengänge pro Tag.

Die praktische Berechnung der Übertemperaturgradstunden muss demgegenüber mit einem realen Außenklima erfolgen. DIN 4108-2 enthält dazu Hinweise auf die, vom BBSR / DWD bereitgestellten Klimadatensätze aus Testreferenzjahren (TRY). Dabei werden die Klimaregionen A - sommerkühl (Referenzstandort Rostock-Warnemünde), B - gemäßigt (Referenzstandort Potsdam) und C - sommerheiß (Referenzstandort Mannheim) unterschieden. Unter veränderlichen Außenklimabedingungen stellt sich keine Temperaturkonstanz im Raum ein. Das Berechnungsziel ist die Summe der Übertemperaturgradstunden für ein Jahr, nämlich das Testreferenzjahr = Normaljahr 2010 bzw. 2011. Der Nachweis der Begrenzung der Übertemperaturgradstunden wird für exponierte Räume durchgeführt.