

Dieses Dokument ist eine Zweitveröffentlichung (Postprint) /

This is a self-archiving document (accepted version):

Peggy Freudenberg, Oda Budny

**Grenzen der Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes
nach DIN 4108-2:2013**

Erstveröffentlichung in / First published in:

Bauphysik. 2022, 44 (1), S. 19–29. Ernst & Sohn. ISSN 1437-0980.

DOI: <https://doi.org/10.1002/bapi.202100044>

Diese Version ist verfügbar / This version is available on:

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-834117>

Grenzen der Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013

Die Methodik der DIN 4108-2 zur Bewertung der Überhitzungswahrscheinlichkeit eines kritischen Raumes entspricht nicht mehr den wissenschaftlichen und technischen Standards. Die Kritik in der Fachliteratur hat zugenommen. Im vorliegenden Artikel werden die Hintergründe der DIN 4108-2 erläutert und bekannte Anwendungsgrenzen und Unzulänglichkeiten aus der Literatur zusammengefasst. Diese betreffen sowohl angenommene Randbedingungen als auch die Abbildung der relevanten physikalischen Effekte und Bewertungsgrößen. Darüber hinaus wird dargelegt, dass Gebäudenutzung, Raumeigenschaften und Klima als relevante Kategorien in der Betrachtung des Überhitzungsrisikos differenzierter abgebildet werden müssen. Anhand von fünf Praxisbeispielen werden Widersprüche zwischen Ergebnissen des vereinfachten Sonneneintragskennwerte-Verfahrens, Simulationen mit Randbedingungen gemäß DIN 4108-2 und Simulationen mit gebäudespezifischen Randbedingungen aufgezeigt. Anhand eines Vergleiches von Mess- und Simulationsergebnissen für einen dieser Beispielsräume werden auch Grenzen der Simulationsrechnungen angesprochen. Ziel der Darstellung ist es, zwischen der wissenschaftlichen Diskussion, die von stark idealisierten Fällen getragen ist, und den planerischen Herausforderungen der Praxis, in welcher die Anwendbarkeit dieser Nachweisansätze oft unklar ist, zu vermitteln.

Stichworte Gebäudesimulation; sommerlicher Wärmeschutz; Überhitzungsrisiko

1 Einleitung

Durch die zunehmenden Hitzeperioden als Folge des Klimawandels [1] und die fortschreitende weltweite Urbanisierung [2], verbunden mit verstärkten Wärmeinseleffekten [3], erhöht sich die Relevanz *des Sommerlichen Wärmeschutzes* (SWS). Daraus ergeben sich zwangsläufig auch höhere Anforderungen an das klimagerechte Bauen. Klimaoptimierte Gebäude sollen heute und zukünftig ein behagliches Innenraumklima gewährleisten, ohne dabei vermeidbare CO₂-Emissionen zu verursachen. Das im November 2020 verabschiedete Gebäudeenergiegesetz [4] fordert daher für alle neu zu errichtenden Gebäude und Gebäudeerweiterungen von mehr als 50 m² Grundfläche den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013 [5].

Das Verfahren wurde 1981 eingeführt und zuletzt 2013 novelliert. Ziele der Novellierung bestanden unter anderem in der Verbesserung der Aussagekraft zur Über-

The limitations of the overheating risk assessment procedures according to DIN 4108-2:2013

The methodology of DIN 4108-2 for assessing the overheating probability of a critical room no longer reflects scientific and technical standards. There is increasing criticism in the literature. The article explains the methodology and background of DIN 4108-2 and summarizes known application limits and shortcomings from the literature. These concern both assumed boundary conditions and the representation of the relevant physical effects and assessment criteria. Furthermore, the paper claims that the building use and geometry must be integrated in a more differentiated manner as a relevant category in the consideration of the overheating risk. On analyzing five practical examples, contradictions between the results of the simplified method, the simulations with boundary conditions according to DIN 4108-2 and the simulations with building-specific boundary conditions are shown. By means of a comparison of measurement and simulation results for one of these example rooms, the limitations of the simulation analyses are also addressed. The aim of this illustration is to mediate between the scientific discussion, which is based on highly idealized cases, and the practice-related planning challenges, where the applicability of these assessment approaches is often unclear.

Keywords building simulation; overheating risk; summer heat protection

hitzungswahrscheinlichkeit von Räumen mit großen Fensterflächenanteilen, leichter Bauweise und Räumen ohne Nachtlüftung [6–8]. In allen diesen Fällen wies das Verfahren in der Normversion 2003 eine unzureichende Aussagefähigkeit auf. Auch weitere Punkte, wie die angesetzten Grenzwerte und die Klimarandbedingungen, standen im Rahmen der Novellierung zur Debatte [6, 7].

Ungeachtet seiner Inaktualität und Kritikpunkte stellen die in der genannten Norm referenzierten Verfahren – ein vereinfachtes Bonus-Malus-Verfahren (Sonneneintragskennwert-Verfahren) und das Simulationsverfahren – die wesentlichen Methoden zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung dar. Sie sollten einer eingehenden Überprüfung unterzogen werden. Dieser Artikel fasst Hinweise zum Anpassungsbedarf der Norm aus Fachpublikationen zusammen und ergänzt diese anhand von fünf Anwendungsbeispielen in Wohn- und Nichtwohngebäuden.

2 Methodik der DIN 4108-2

Das vereinfachte Verfahren oder Sonneneintragskennwert-(SEK-) Verfahren wurde von Hauser und Gertis 1979 als Normungsvorschlag kurz vor der Aufnahme des sommerlichen Wärmeschutzes in die DIN 4108 im Jahr 1982 entwickelt [9]. Es basiert auf einem Schema mit Bonus- und Malus-Werten, die den Einfluss der als relevant betrachteten physikalischen Zusammenhänge des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden gewichten. Die damals entworfene Grundstruktur wurde bis in die Version 2013 erhalten, allerdings weitreichend ergänzt und korrigiert [7]. Grundlage für diese Anpassungen bildeten jeweils Simulationsstudien mit der Software *Hauser*. Als Randbedingungen und Bewertungsgrößen wurden die aus der Normfassung 2013 in Abschnitt 8.4 aufgeführten Randbedingungen und Bewertungsgrößen für die thermische Gebäudesimulation definiert. Die Hintergründe und Vorgehensweisen für diese Studien sind in [7] ausführlich dargelegt.

Die Nutzungs-Randbedingungen, z. B. interne Wärmeeinträge, werden in diesen SEK (Sonneneintragskennwerte) nicht erfasst und als unveränderlich angenommen. Eine Übersicht über die definierten Eigenschaften enthält Tab. 1. Interne Wärmeeinträge für Nichtwohnnutzung orientieren sich am Nutzungstyp *Einzelbüro* der DIN V 18599-10. Sie betragen 132 Wh/(m²d) und wurden zu 100% konvektiv angesetzt.

Die Festlegung der Bewertungskenngrößen und der Grenzwerte ist wirtschaftlich begründet. Das SEK-Verfahren aus dem Jahr 2003 wurde am Grenzwert einer 10%-igen Überschreitungshäufigkeit von drei Klimazonen-abhängigen Grenzwerten der Raumlufttemperatur ausgerichtet [10]. Der Grenzwert konnte, da er auf die Nutzungszeit bezogen war, sowohl auf den Wohn- als auch den Büroraum angewandt werden. In der Normver-

sion 2013 wurde als Bewertungskenngröße das Maß der Übertemperaturgradstunden eingeführt, weil diese neben der Dauer auch die Überschreitungshöhe einbeziehen. Die Bewertungsgrenzwerte für die Zulässigkeit eines Gebäudes wurde jedoch am vorherigen Grenzwert ausgerichtet, wodurch keine Erhöhung des Anforderungsniveaus mit dem veränderten Grenzwert einherging. Für Nichtwohngebäude ergab sich damit das Äquivalent von 500 Kh/a. Das Anforderungsniveau für Wohngebäude sollte verändert und mit Reduktion der aktiven Nutzungszeit effektiv erhöht werden. Eine Verringerung dieser Auswertungs-Bezugszeit von 24 Stunden auf 16 Stunden täglich hätte jedoch einen Anstieg des Anforderungsniveaus um bis zu 30% bedeutet und wurde daher vom Normungsausschuss Wärmetransport abgelehnt. Der letztlich definierte Grenzwert beträgt daher für Wohngebäude 1200 Kh/a und entspricht einer mittleren Erhöhung des Anforderungsniveaus um 15%.

3 Literaturlauswertung

Im Zusammenhang mit den von Schlitzberger [7] durchgeführten Simulationsstudien wurden bereits einige kritische Fälle benannt, in denen das vereinfachte Verfahren im Vergleich zu den Simulationsergebnissen keine zuverlässigen Ergebnisse liefert. Auch bei der Verwendung von Simulationsmodellen kann die Nachweisrechnung zu unzuverlässigen Ergebnissen führen. Eine Ursache hierfür sind unrealistische Randbedingungen (Klimadaten, Nutzung). Auf diese Aspekte wird nachfolgend näher eingegangen.

3.1 Klimarandbedingungen

Die Klimaannahmen der DIN 4108-2:2013 werden von mehreren Autoren sowohl in Bezug auf das vereinfachte

Tab. 1 Randbedingungen in den Simulationsreihen von Schlitzberger [6, 7] zur Korrektur des SEK-Verfahrens (Sonneneintragskennwert-Verfahren)
Boundary conditions in Schlitzberger's simulation series [6, 7] for the correction of the SEK method (solar energy transmittance value method)

Nutzungszeit	Wohngebäude Nichtwohngebäude	täglich, 0:00 bis 24:00 Uhr Mo.-Fr., 7:00 bis 18:00 Uhr keine Ferienzeiten
Außenklima	Klimaregion A Klimaregion C	mittleres Jahr TRY-2011 Zone 2: Rostock Zone 12: Mannheim
Bauarten	leicht mittel schwer	$c_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ $c_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ $c_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$
Nachtlüftung	erhöhte Nachtlüftung hohe Nachtlüftung	$n_L = 2 \text{ h}^{-1}$ $n_L = 5 \text{ h}^{-1}$
Fensterflächenanteil	grundflächenbezogen fassadenbezogen	$f_{\text{WG}} = \{15\%, 25\%, 36\%, 51\%\}$ $f_{\text{WF}} = \{30\%, 50\%, 70\%, 100\%\}$
Verglasung	Annahme zur Berechnung von S_3	g_{\perp} -Wert = 0,4
geneigtes Fenster	Annahme zur Berechnung von S_4	$\beta = 30^\circ$ bei einem fassadenbezogenen Fensterflächenanteil von 30%

Verfahren als auch in Bezug auf das Simulationsverfahren als unsicher eingestuft [7, 11–14, 19]. Diskrepanzen ergeben sich, da die Klimadatensätze der Testreferenzjahre (TRY) stark vereinfacht in die Norm überführt wurden. Es sind darin lediglich drei Klimazonen (A, B und C) definiert, zu welchen jeweils nur eine der 15 vom Deutschen Wetterdienst (DWD) ausgearbeiteten Stationen zugeordnet ist. Damit ergeben sich erhebliche regionale Unterschiede zwischen Norm- und Realklima, die zum Teil auf Höheneffekten beruhen, zum Teil auf Mesoklimaunterschieden wie dem Stadtklima. Für die Berücksichtigung dieser Effekte wurden vom DWD bereits für die Anwendung innerhalb einer TRY-Region Aufprägungsansätze entwickelt [15]. Die Norm griff diese Empfehlungen nicht auf. Große Unterschiede zwischen realen Klimaverhältnissen und Norm-Klimadatensatz existieren laut [7] für die tiefergelegenen Orte, d. h. TRY-Region 10 – Südöstliches Mittelgebirge und TRY-Region 14 – Schwäbische Alb (Norm-Zuordnung zur Klimaregion A) sowie die TRY-Region 9 – Thüringer Becken & Sächsisches Hügelland und TRY-Region 13 – Schwäbisch-fränkisches Stufenland/Alpenvorland (Norm-Zuordnung zur Klimaregion B) [7]. Auch die eigens für die Überhitzungsbemessung vom DWD erarbeiteten sommerheißen Jahre und die Zukunftsklimadatensätze fanden in der Normüberarbeitung keine Berücksichtigung.

Windhausen und Schmidt [13] monieren ebenfalls die Größe der Klimaregionen sowie die fehlende Unterscheidung zwischen städtischen Kernbereichen, städtischen Randbereichen und ländlichen Bereichen. Als methodisch geeigneter bewerten die Autoren die Verwendung standortgetreuer anstatt standortbezogener Datensätze, ferner die Verwendung der wahren Ortszeit anstatt der mitteleuropäischen Zeit. Diese Differenzierung würde zu einer höheren Variation (335.000 Datensätzen) und vielfältigeren Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz führen [13]. Die erforderlichen Datensätze existieren mit der Veröffentlichung der Testreferenzjahre 2017 [16].

Neben mesoklimatischen Effekten mit größerer geografischer Ausdehnung kann auch das unmittelbare Umgebungsklima des Bauwerks (Mikroklima) den sommerlichen Wärmeschutz beeinflussen. Die Auswirkung des Mikroklimas für die sommerliche Überhitzung lässt sich anhand von Mikroklimasimulationen explizit bewerten [17, 18] und als Randbedingung in Simulationsrechnungen ansetzen [17]. In einer Studie wurde der Effekt von Begrünung (extensive Dachbegrünung und Moosfassaden) ermittelt [18]. Auch bei hohem Dämmstandard ergab sich eine merkliche Verringerung der Raumlufttemperatur im Gebäude. Die Begrünung erhöht die Verschattung und Dämmwirkung des Gebäudes, zudem verändert sie die Strömungsverhältnisse an den Gebäudeoberflächen. Im Rahmen des Projektes *Heat Resilient City* stellte sich heraus, dass der mikroklimatische Einfluss der Wind- und Strahlungsverhältnisse auf die Raumtemperatur gewichtiger ist als die örtliche Variation der Außenlufttemperatur. Strahlungseinträge und die Windgeschwindigkeiten nehmen u. a. mit der Gebäudehöhe zu.

Für diese Studie wurde ein mit Mehrfamilienhäusern bebauter städtischer Quartier in Erfurt simuliert und messtechnisch erfasst [17].

3.2 Kritik Sonneneintragskennwerte-Verfahren

In der Überarbeitungsdokumentation der Normfassung 2013 [7] wurden bereits einige kritische Anwendungsbereiche benannt, so wird beispielsweise das Überhitzungsrisiko in Wohnräumen mit geneigter Fensterfläche und moderatem Fensterflächenanteil vom vereinfachten Verfahren unterschätzt. Das Überhitzungsrisiko bei zunehmendem Luftwechsel und zunehmender Bauschwere wird hingegen mit übermäßiger Sicherheit bewertet. Darüber hinaus bringt die unzureichende Abstufung geringer, mittlerer und hoher interner Wärmeeinträge für die Wohn- und Nichtwohnnutzung einen erheblichen Fehlerbereich mit sich [10].

Für einen Modellraum gemäß DIN EN ISO 13791-8 mit Büronutzung wurden vergleichende Berechnungen für das vereinfachte Verfahren und Simulationen gemäß DIN 4108-2:2013 in [24] vorgenommen. Es stellte sich heraus, dass das Sonneneintragskennwerte-Verfahren für Bürogebäude häufiger zu einer Zulässigkeitsbeurteilung des Raumes führt als die Simulation. Dabei zeigt sich, dass es insbesondere Räume ohne Nachtlüftung im Vergleich zur Simulation zu günstig bewertet. Bei leichter Bauweise tritt eine Fehleinschätzung mit einer Wahrscheinlichkeit von 24% und bei schwerer Bauweise mit einer Wahrscheinlichkeit von 33% auf. Bei schwerer Bauart mit erhöhter oder hoher Nachtlüftung liegt das Sonneneintragskennwerte-Verfahren auf der sicheren Seite, selbst dann, wenn die Zukunftsdatensätze des TRY 2011 angesetzt werden [24].

Eine weitere relevante Abweichung des Sonneneintragskennwerte-Verfahrens von der Simulation ist bei Büroräumen mit zum Nordquadranten ausgerichteten Fensterflächen festgestellt worden. Insofern ein leicht-verschattender Sonnenschutz ($F_c = 0,25$) angebracht wird, geht der Nachweis nach dem Sonneneintragskennwerte-Verfahren auf, obwohl in den simulierten Räumen in 33% der Fälle weitere Maßnahmen ergriffen werden müssten. Solange kein Sonnenschutz vorhanden ist und Zulässigkeit vom vereinfachten Verfahren bescheinigt wird, ist das Ergebnis als zuverlässig einzustufen. Das gilt sogar für Vergleichssimulationen mit Zukunftsdatensätzen der TRY 2011. Je höher hingegen der F_c -Wert ist, desto stärker überschätzt das vereinfachte Verfahren dessen Effekt und umso größer wird der Unterschied zur Simulation.

3.3 Kritik thermische Raumsimulation

Eine Bewertung von Simulationsrechnungen für den Sommerfall kann in zwei Ansätzen geführt werden, dem Vergleich mit anderen Simulationsprogrammen oder dem Vergleich mit Messungen.

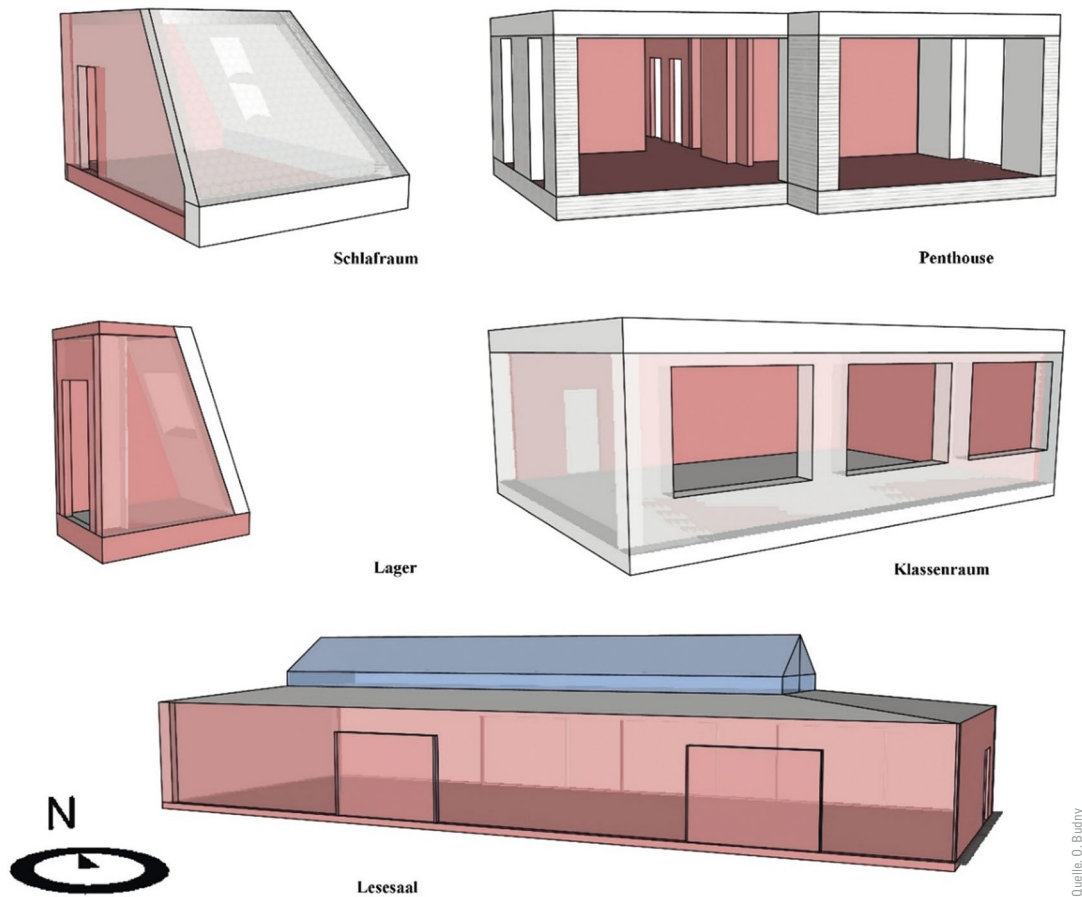


Bild 1 Isometrie-Darstellungen der gewählten fünf Fallbeispiele
 Isometric representations of the selected five case studies

Ein systematischer Vergleich zwischen Simulationsrechnungen nach Norm-Randbedingungen und Messungen ist den Autorinnen für den DIN-Ansatz des sommerlichen Wärmeschutzes nicht bekannt. Er wurde jedoch anhand des britischen Standards TM59 geführt [20]. Er erfolgte für drei Wohnungen in London zwischen gemessenen und simulierten operativen Raumtemperaturen. Es stellte sich heraus, dass die mit *Energy Plus* simulierten Werte wesentlich unterhalb der gemessenen Werte lagen und deutlich stärkere Tagesschwankungen aufwiesen. Neben TM59-spezifischen Kritikpunkten offenbarte sich, dass eine exakte Modellierung des solaren Strahlungseinfalls in den Raum einschließlich der baulichen Verschattung (Nachbargebäude, Eigenverschattung, Reflexionseffekte etc.) essenziell ist. Darüber hinaus sollten Unsicherheiten in baukonstruktiven und baustofflichen Annahmen sowie Unsicherheiten in den Berechnungsrandbedingungen in ihrer Auswirkung abgeschätzt werden. Die Autoren kritisieren zudem den unzureichenden Bewertungsansatz, der in der TM59 nach dem adaptiven Komfortbewertungsmodell (EN 15251) geführt wird. Anhand mehrerer Literaturreferenzen wird belegt, dass die Wahrnehmung der thermischen Behaglichkeit in einigen Personengruppen erheblich von der tatsächlichen gesundheitlichen Wärmebelastung abweicht und daher sinnvolle Grenzwerte neu erörtert werden sollten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts SimQuality wurden elf detaillierte Testfälle zur Validierung von Gebäude-

simulationsprogrammen entwickelt und der Allgemeinheit auf einer Webseite zur Verfügung gestellt [21]. Ziel der Validierung ist es, Simulationsmodell-Standards zu entwickeln und mit deren Hilfe Fehler in den Programmen zu eliminieren, die sich im Abgleich der verschiedenen Programmresultate für scharf definierte Simulationsfälle offenbaren. In erster Linie sind diese Fehler auf Modellierungs- und Programmierfehler zurückzuführen. Ähnliche Ansätze, jedoch mit deutlich schlechterer Dokumentation und damit fragwürdiger Aussagefähigkeit sind auch aus VDI 6020-1 (2001), DIN EN ISO 13791 (2012) oder ANSI/ASHRAE Standard 140 (2011) bekannt.

4 Beispielhafte Anwendungsfälle

Zur Veranschaulichung der Anwendungsgrenzen wurden fünf Beispielfälle herangezogen. Für zwei Wohnräume (Jugendzimmer und Penthouse) und drei Räume in Nichtwohngebäuden (Klassenraum, Lager, Lesesaal einer Bibliothek) sind Vergleichsrechnungen zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN und nach eigenen Randbedingungen nachfolgend aufgeführt. Die Anwendungsszenarien und Berechnungen basieren auf einer Diplomarbeit und einer Projektarbeit, die an der TU Dresden in Zusammenarbeit mit Praxispartnern entstanden sind [22, 23].

Bild 1 veranschaulicht die gewählten Räume. Rötlich eingefärbte Flächen grenzen an benachbarte Räume an und

Tab. 2 Geometrie, Konstruktionseigenschaften und Nutzungscharakteristik der gewählten Räume
Geometry, construction properties and usage characteristics of the selected rooms

Größe	Einheit	Schlafraum	Penthouse	Klassenraum	Lager	Lesesaal
A_{net}	m ²	22,5	49,2	70,0	2,9	144,8
h_{licht} (Mittelwert)	m	2,4	2,7	3,0	2,2	3,8
$A_{\text{bc,e,Außenmaß}}$	m ²	48,0	123,9	179,7	4,4	296,8
$A_{\text{bc,i,licht}}$	m ²	59,3	124,9	121,0	18,3	170,8
c_{wirk}	Wh/(m ² K)	85	40	135	59	
A_{win}	m ²	2,2	28,3	16,2	1,1	45,0
$f\omega_{\text{G}}$	-	0,10	0,58	0,23	0,38	0,31
$f\omega_{\text{Vair}}$	1/m	0,04	0,21	0,08	0,22	0,08
g_{senk}	-	0,64	0,48	0,64	0,48	0,51
F_{c}	-	1,00	0,25	0,25	0,25	0,75
Steuerung F_{c}	-	-	automatisiert	automatisiert	automatisiert	feststehend
Nutzung	-	Wohngebäude	Wohngebäude	Nichtwohngebäude	Nichtwohngebäude	Nichtwohngebäude
$q_{\text{pers+fac+light}}$	Wh/(m ² d)	86	41	384	0	14
Taglüftung $n_{\text{L,max}}$	h ⁻¹	0,50	3,00	3,30	0,24	2,06
Nachtlüftung $n_{\text{NL,max}}$	h ⁻¹	2,00	2,00	2,00	0,24	0,25
Steuerung $n_{\text{NL,max}}$	-	manuell	temperaturgesteuert	manuell	-	zeitgesteuert

wurden als adiabat betrachtet. Den weißen Außenbauteilflächen wurden Außenklimarandbedingungen (Klimaregion C nach DIN 4108-2:2013) aufgeprägt. Die Transparenz der Front-Bauteilflächen dient der Sichtbarkeit der Raumkubatur. In Tab. 2 sind die wichtigsten Daten zu Geometrie, Konstruktion, Fenstern, Sonnenschutz, inneren Wärmelasten und Lüftung für diese Räume (Realfall) aufgeführt.

In Tab. 3 sind die Nachweisergebnisse der Anwendungsszenarien nach dem Sonneneintragskennwertverfahren (SEK), der Simulation nach DIN-Randbedingungen (SIM_DIN) und der Simulation nach realistischen Randbedingungen (SIM_RB) gemäß Tab. 2 verglichen. Für die Simulationen nach eigenen Randbedingungen wurde ein realistisches stündliches Belegungsprofil (Luftwechsel, Nutzungs-Wärmelasten) für die Räume festgelegt. Zudem wurde der Infiltrationsluftwechsel in Abhängigkeit der Bauweise gewählt. Der Grundluftwechsel und die inneren Wärmelasten wurden in Anlehnung an die DIN V18599 festgelegt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden für die Auswertung beider Simulationsfälle die Bewertungsgrößen und Grenzwerte der DIN 4108-2:2013 herangezogen. Für die Simulation wurde die Software THERAKLES [24] verwendet, welche nach den in Abschnitt 3.3 erwähnten SimQuality-Referenzfällen validiert worden ist [25].

Für das Jugendzimmer mit zwei geneigten Dachfenstern ohne Sonnenschutzvorrichtung kann der Nachweis nach dem SEK-Verfahren erbracht werden, während beide

Tab. 3 Gegenüberstellung der Nachweisergebnisse des SEK und der thermischen Raumsimulation nach DIN 4108-3:2013 mit der Simulation anhand genauerer Randbedingungen für fünf Anwendungsszenarien
Comparison of the verification results of the SEK method (solar energy transmittance value method) and the thermal room simulation according to DIN 4108-3:2013 with the simulation using more precise boundary conditions for five application scenarios

Szenario Nachweisergebnis				
Nr.	Name	SEK	SIM_DIN	SIM_RB
1	Schlafzimmer	zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
2	Penthouse	nicht zulässig	zulässig	zulässig
3	Lager	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
4	Klassenraum	zulässig	zulässig	nicht zulässig
5	Lesesaal	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig

Simulationenachweise Unzulässigkeit bescheinigen. Das Überhitzungsrisiko von Räumen mit Dachfenstern, d. h. geneigten Fensterflächen, ist in der Praxis ein kritischer Fall, wird allerdings von dem SEK-Verfahren nicht erkannt. Der Nachweis des Penthouse-Wohnbereichs mit automatisierter Sonnenschutz- und Fensterlüftungssteuerung geht nach dem vereinfachten Verfahren nicht auf, während das Überhitzungsrisiko in den Simulationen als gering eingestuft wird. Das SEK-Verfahren kann die

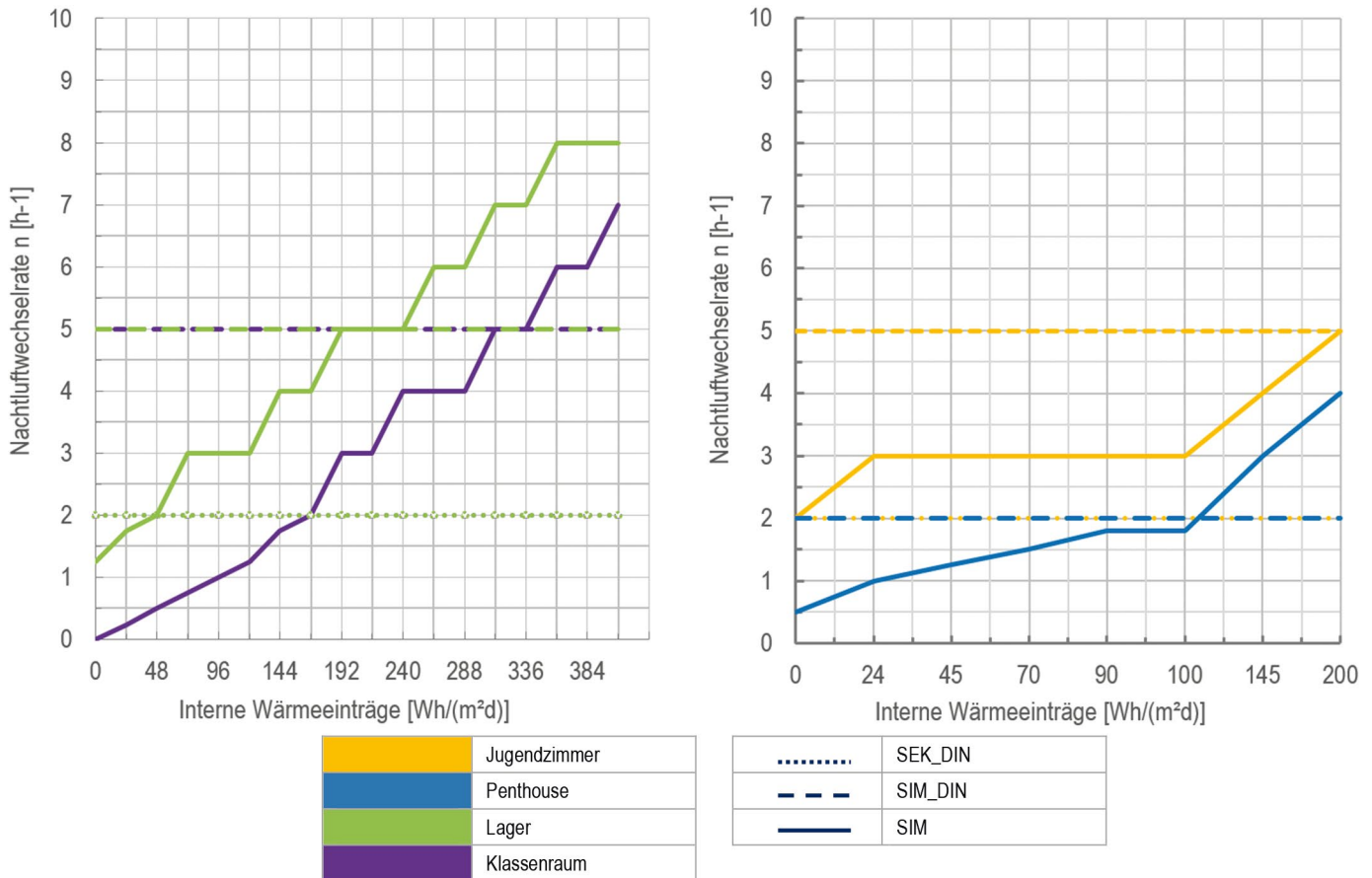


Bild 2 Diagrammübersichten der Variation von Luftwechsel und Nutzungswärmelasten zur Ermittlung nachweiserfüllender Kombinationen für die beiden Räume im Nichtwohngebäude (links) und Wohngebäude (rechts)
 Diagram overviews of the variation of air change and thermal loads by usage to determine combinations that meet the DIN requirements for the two rooms in the non-residential building (left) and residential building (right)

Vorteile einer automatisierten Sonnenschutz- und Lüftungssteuerung nicht abbilden, hier ist eine thermische Raumsimulation notwendig. Der Klassenraum ist aufgrund der hohen Personendichte und den damit verbundenen hohen inneren Wärmelasten in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz ein Problemfall. Dies wird von der DIN 4108-6 nicht erkannt, da das Ansetzen realistischer Nutzungsrandbedingungen sowohl im vereinfachten als auch im simulationsbasierten DIN-Nachweis nicht möglich ist. Der Lagerraum und der Lesesaal werden von allen Verfahren als unzulässig erkannt. Dabei ist der Lagerraum kein Aufenthaltsbereich, wird jedoch nicht vom Normnachweis ausgeschlossen. Das Überhitzungspotenzial des Lesesaales ist anhand von Messwerten belegt. Allerdings besteht hier eine erhebliche Hürde in der Auswahl eines passenden Simulationsmodells für die Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen, da dieser Raum zwei Besonderheiten aufweist, die von gängigen Simulationsmodellen nicht zu berechnen sind: Stratifizierung in Folge der großen Raumhöhe von über 4 m und Strahlungsdurchgang durch Glasaufbauten.

4.1 Variantenrechnungen für die gewählten Fallbeispiele

Ein Kritikpunkt am bestehenden SEK-Verfahren ist die unzureichende Differenzierung der Nutzungsrandbedin-

gungen in Bezug auf die Verfahrensgültigkeit und die Verfahrensrandbedingungen. In den älteren Versionen der DIN 4108-2 war der Gültigkeitsbereich des Normverfahrens explizit auf Wohn- und Bürogebäude beschränkt. In der aktuellen Norm ist diese Anwendungsgrenze nicht aufgeführt. In der Fassung von 2013 wurde zudem für den Begriff *Bürogebäude* der Begriff *Nichtwohngebäude* eingeführt, jedoch nicht um eine Verfahrenserweiterung ergänzt. Der Begriff *Nichtwohngebäude* ist in der DIN V 18599 Teil 10:2018 mit 41 Nutzungsprofilen hinterlegt, in der DIN 4108-2 jedoch nur mit einem Nutzungsprofil: dem des Einzelbüros. Eine aussagefähige Nachweisführung ist daher nur für solche Nutzungstypen anzunehmen, deren Eigenschaften wohnnutzungssähnlich sind. Hier kommt es nicht allein auf die Zeitprofile und Höhe der inneren Lasten, sondern auch auf die Förderströme bzw. Luftwechselraten an. Für nachzuweisende Räume können die inneren Wärmelasten in begrenztem Maße über die Lüftung abgeführt werden. Wann dieser Zusammenhang nicht mehr abgebildet wird und große Unterschiede zum Realfall erzeugt, zeigen die beiden Variantenübersichten in Bild 2 jeweils für die beiden Beispielräume in Wohngebäuden (rechts: Penthouse und Jugendzimmer) und die beiden Räume in Nichtwohngebäuden (links: Klassenraum und Lager). Gegenübergestellt sind jeweils drei Nachweismethoden: der vereinfachte Nachweis nach SEK-Verfahren nach DIN 4108-2:2013 Abschnitt 8.3 (SEK_DIN), die thermische

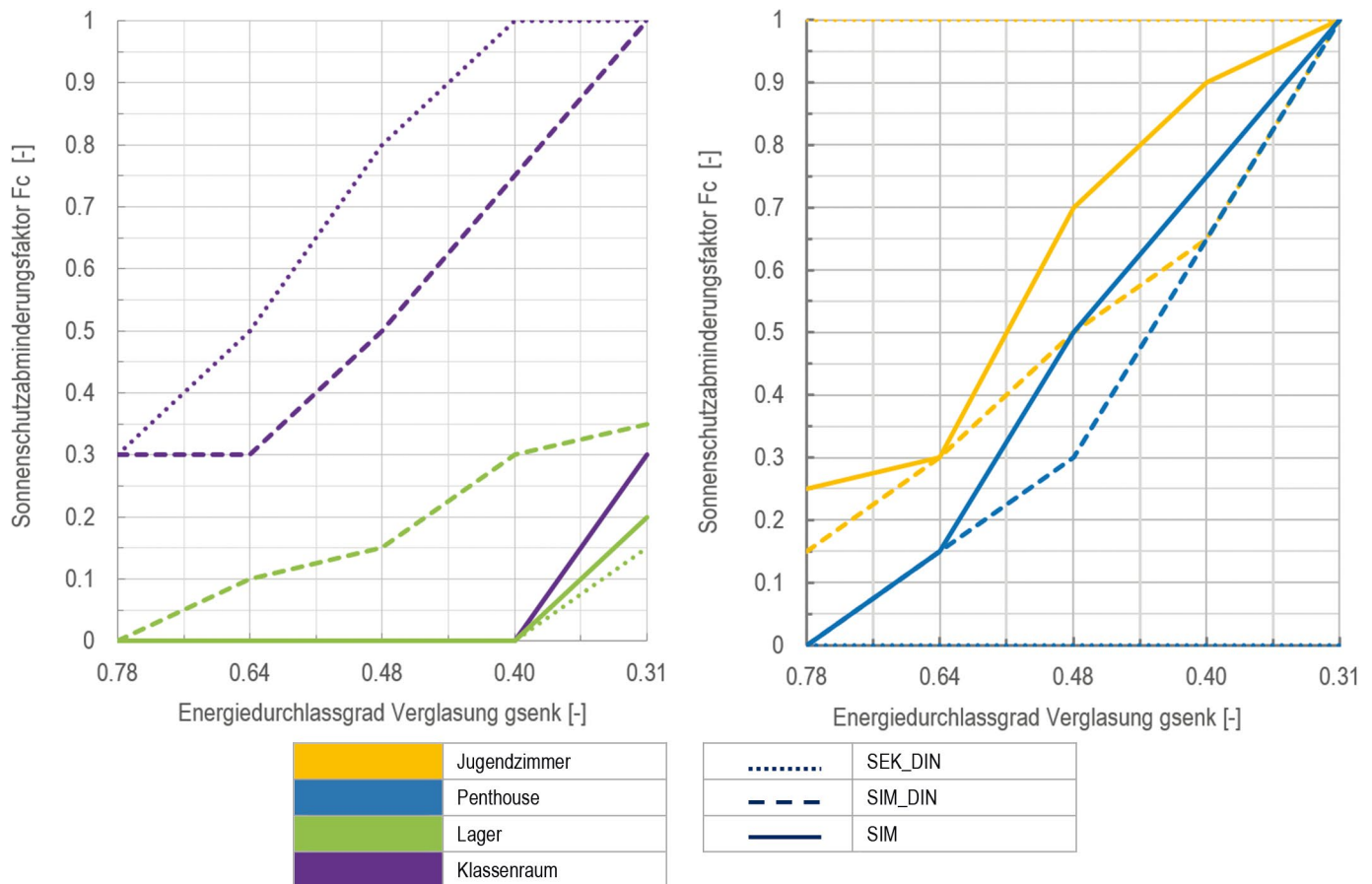


Bild 3 Diagrammübersichten der Variation von Gesamtdurchlassgrad und Sonnenschutz-Abminderungsfaktor zur Ermittlung Nachweis-erfüllender Kombinationen für die beiden Räume im Nichtwohngebäude (links) und Wohngebäude (rechts)
 Diagram overviews of the variation of total solar energy transmittance and sun protection reduction factor to determine combinations that meet the DIN requirements for the two rooms in the non-residential building (left) and residential building (right)

Raumsimulation mit den Randbedingungen nach DIN 4108-2:2013 Abschnitt 8.4 und die thermische Raumsimulation mit eigenen Randbedingungen (SIM_RB).

In der Gegenüberstellung der Abgängigkeit zwischen Luftwechsel und Wärmelasten zeigt sich, dass das SEK-Verfahren und das Simulationsverfahren nach der DIN 4108-2 keine Möglichkeit zur Variation der internen Wärmeeinträge bieten. Unabhängig von den tatsächlichen Wärmelasten wäre eine Zulässigkeit mit erhöhter bzw. hoher Nachluftwechselrate für drei von vier Räumen im vereinfachten Ansatz gegeben.

Für die beispielhaften Wohnräume sind die Wärmelasten im Schlafraum etwa doppelt so hoch wie im Penthouse, da Nutzungsdichte und Nutzungszeit im zweiten Fall geringer sind. Im Vergleich zwischen DIN-Nachweisen und Simulation zeigt sich, dass die Aussagefähigkeit für Wohngebäude bei Wärmeeinträgen von bis zu 100 Wh/(m²K) gegeben ist. Darüber wird für das Penthouse der erforderliche Nachluftwechsel im vereinfachten Ansatz unterschätzt. Der Nachweis nach dem SEK-Verfahren ist für diesen Raum auch mit hoher Nachlüftung nicht möglich, daher fehlt diese Gerade im Diagramm.

Für die anderen beiden Räume in Nichtwohngebäuden ist zu beachten, dass die Spannweite der vorhandenen

Wärmeeinträge größer ist. Der Klassenraum weist interne Wärmeeinträge von 384 Wh/(m²K) und der Lagerraum weist keine internen Wärmeeinträge auf. Die DIN-Randbedingung ist auf 144 Wh/(m²K) festgelegt. Während der DIN-Simulationsnachweis für das Lager erst bei einer Nachluftwechselrate von mind. 5 h⁻¹ erfüllt ist, müsste er nach realen Bedingungen bei 1,25 h⁻¹ liegen. Hier ist das SEK-Verfahren näher an der Simulation mit genaueren Randbedingungen als die Simulation nach DIN.

Auch in Bezug auf die Modellierung des Strahlungseinfalls sind in den Verfahren unterschiedliche Ansätze zu finden. Im Gegensatz zu den Nutzungsbedingungen sind jedoch alle Verfahren dazu geeignet, den kontinuierlichen Zusammenhang abzubilden. Die nachfolgende Variantenübersicht in Bild 3 zeigt, welcher Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes für variierende Energiedurchlassgrade der Verglasung zu wählen ist, damit der Nachweis des SWS jeweils für die beiden Räume im Wohngebäude (Bild 3 rechts) und im Nichtwohngebäude (Bild 3 links) erfüllt ist.

Im Schlafzimmer (Bild 3 rechts, gelbe Geraden) ist der Nachweis nach dem SEK-Verfahren ohne Sonnenschutz ($F_C = 1$) erbracht, während die Norm-Simulation die höchsten Anforderungen an den Sonnenschutz-Abmin-

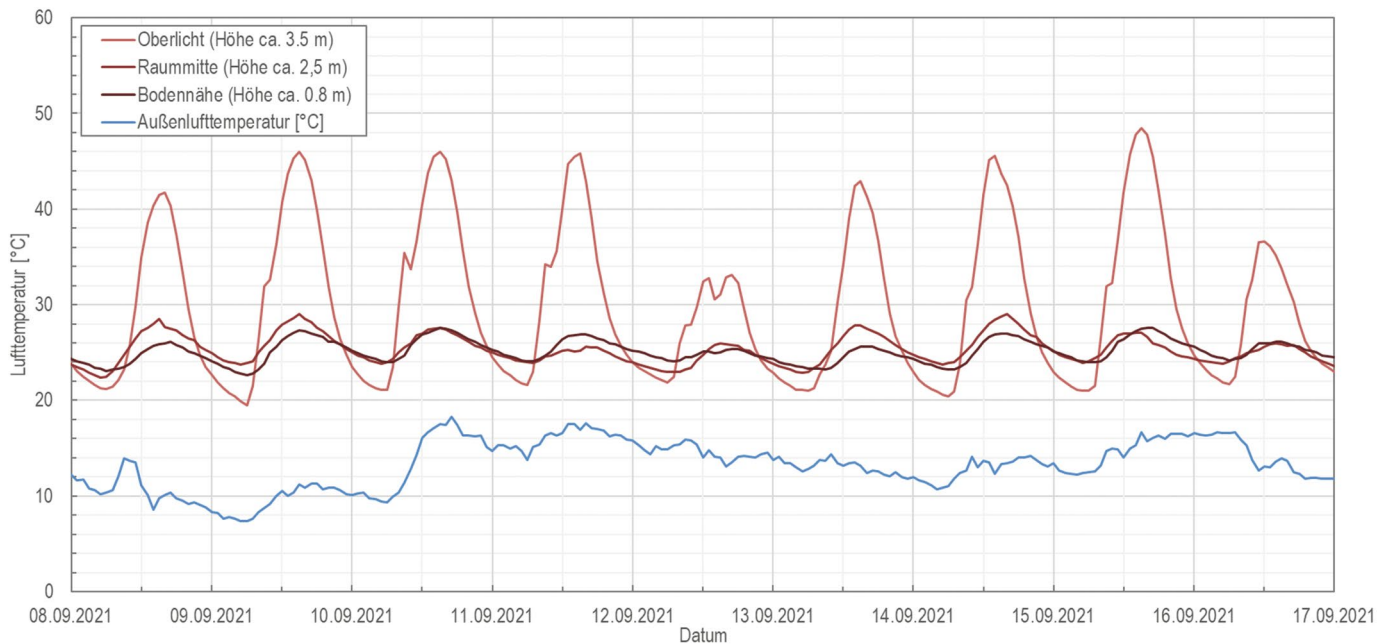


Bild 4 Darstellung der Messdaten für Raum- und Außenklima für eine Messphase Mitte September 2021 im Lesesaal am Standort Dresden
Presentation of the measured data for indoor and outdoor climate for a measurement phase in mid-September 2021 in the reading room in Dresden

derungsfaktor stellt, d.h. die geringsten Faktoren fordert. Der vereinfachte Nachweis gewährt für diesen Fall folglich keine Sicherheit. Die Simulation mit realistischen Randbedingungen schätzt die notwendigen Maßnahmen geringer als die DIN-Simulation ein, d.h. die erforderlichen F_c -Werte sind höher. Das Wohnzimmer im Penthouse (Bild 3 rechts, blaue Geraden) weist einen sehr hohen Glasflächenanteil sowie eine automatisierte Lüftungs- und Sonnenschutzsteuerung auf. Der hohe Fensterflächenanteil lässt sich auch bei erhöhter Nachtlüftung im vereinfachten SEK-Verfahren durch keine Sonnenschutzmaßnahme ausgleichen. Für diesen Fall stellt die DIN-Simulation, ebenso wie im Schlafzimmer, höhere Anforderungen an den Sonnenschutz als die angepasste Simulation. Für die Beispielräume aus Nichtwohngebäuden (Bild 3 links) liegen die Geraden noch deutlich weiter auseinander als für die Wohnräume. Im Falle des Klassenraumes (Bild 3 links, violett) weist das SEK-Verfahren die geringsten Anforderungen an den Sonnenschutz auf. Für das Lager (Bild 3 links, grün) kehrt sich dieser Fall um, dort fordert das SEK-Verfahren den wirksamsten Sonnenschutz, die Simulationsrechnung fordert geringere Kennwerte. Grundsätzlich wird dieser Raum jedoch von allen Verfahren als kritisch beurteilt, d.h. es werden sehr niedrige F_c - bzw. g -Werte gefordert. Der Klassenraum hingegen lässt sich in der DIN-Simulation mit einem F_c -Wert von 0,25 für jeglichen Energiedurchlassgrad der Verglasung nachweisen. Der Nachweis für die Simulation nach angepassten Randbedingungen geht nur bei einer Sonnenschutzverglasung mit $g_{\text{senk}} = 0,31$ auf. Derartige Klassenräume sollten vom SWS-Verfahren mit Sicherheitszuschlag bewertet werden; zahlreiche Praxisfälle und Studien zeigen, dass das Überhitzungsrisiko in Klassenräumen sehr hoch ist [26].

4.2 Grenzen der Simulationsmodelle

Eine thermische Simulation des sommerlichen Wärmeschutzes birgt bei ausreichender Differenzierung und gewährleisteten Qualitätsanforderungen an das Modell in jedem Fall das höchste Potenzial für die Bewertung des instationären sommerlichen Überhitzungsfalls. Dieser Umstand wurde auch in der Novellierung des Kühllastberechnungs-Standards VDI 2078 honoriert [27], welcher seit der Neufassung im Jahr 2015 auf Simulationsnachweise setzt und dabei deutlich differenziertere Vorgaben zu Nutzungs- und Klimarandbedingungen, Simulationsmodellanforderungen etc. trifft. Es darf dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass auch Simulationsmodelle einen begrenzten Anwendungsbereich aufweisen, der am Beispiel des Lesesaals nachfolgend angerissen werden soll. Für den gewählten Raum wurden im Zeitraum Juni bis September Raumklimamessungen an unterschiedlichen Positionen im Raum erfasst. Einen Überblick über diese Messergebnisse und den Verlauf der Außenlufttemperatur bietet Bild 4.

Es zeigt sich, dass bereits innerhalb des Raumes große Lufttemperaturunterschiede existieren, die unter anderem auf eine erhebliche Stratifizierung in Folge der Raumhöhe und Geometrie zurückzuführen sind. Zusätzlich verfügt der Raum über einen Glasdachaufbau, der in ein sinnvolles Modell überführt werden muss. Die meisten Simulationsmodelle können derartige Aufbauten nicht abbilden. Eine Modellierung aller Teilflächen würde zu einer Überschätzung der Strahlungseinträge führen, da das Passieren der kurzwelligen Strahlung durch mehrere Glasflächen eine Strahlenverfolgung im Modell erfordert, die sowohl die Lagebeziehung der Bauteile zueinander als auch die konkreten Durchlässigkeitseigenschaften

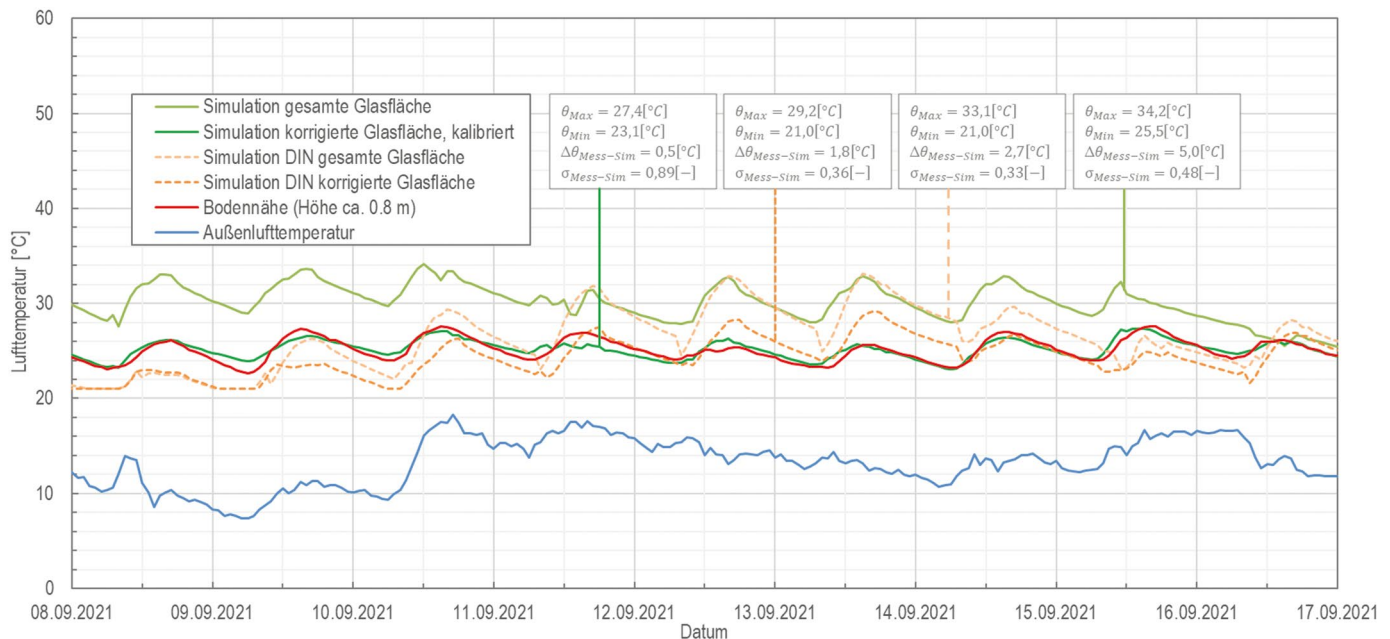


Bild 5 Darstellung der Simulationsergebnisse für unterschiedliche Varianten der Glasflächenmodellierung und der Randbedingungen Mitte September 2021 im Lesesaal am Standort Dresden
 Presentation of simulation results for different variants of glass area modelling and boundary conditions mid-September 2021 in the reading room in Dresden

nach Einstrahlwinkel als Kennwerte erfordert. Diese Geometrieinformationen und Modelle führen nur wenige Programme. Ähnlich verhält es sich mit Stratifizierungseffekten in hohen Räumen. Im vorliegenden Fall wurde ein Simulationsmodell erstellt und anhand der Messdaten im unteren Raumbereich kalibriert. Zu diesem Zweck wurden die Randbedingungen des Infiltrationsluftwechsels (zeitkonstant), der inneren Wärmelasten, des auf Grund des Bestandes nicht genau bekannten g-Wertes der Dachverglasung, des manuell einstellbaren Förderstroms während der Nutzungszeit und die effektive Glasfläche des Dachaufbaus in einer globalen Optimierungsvariation ermittelt. Der Ansatz ist in [28] geschildert, es wurde jedoch *THERAKLES* als Rechenkern verwendet. Dieses kalibrierte Modell wurde in Bild 5 drei weiteren Varianten für den Simulations-Klimadatensatz Dresden-Klotzsche gegenübergestellt. Die Messdaten der Außenlufttemperatur und der Lufttemperatur in Bodennähe sind darin ebenfalls dargestellt. Die verglichenen Varianten sind neben dem kalibrierten Modell (Bild 5, dunkelgrün), eine Variante mit vollständiger Glasflächenmodellierung und DIN-Randbedingungen (Bild 5, gelb gestrichelt), eine Variante mit korrigierter Glasflächenmodellierung und DIN-Randbedingungen (Bild 5, orange gestrichelt), sowie eine Variante mit vollständiger Glasfläche und realistischen Randbedingungen (Bild 5, hellgrün).

In der Auswertung der Simulationsergebnisse für diesen Raum zeigt sich, dass die Ergebnisse je nach Modellierungsansatz stark abweichen. Das kalibrierte Modell, welches im dargestellten Zeitraum eine mittlere Abweichung zum Messdatensatz von $0,6^{\circ}\text{C}$ und eine Korrelation von $0,94$ aufweist, weicht vom Norm-Ansatz bei einer Bezugs-Grenztemperatur von 26°C im Jahr um 5500 Kh ab (kalibriert: 9300 Kh , DIN: 3800 Kh). Eine Modellie-

rung aller Teilflächen des Glasaufbaus würde zu einem Kennwert von 23.800 Kh führen, wenn realistische Randbedingungen angesetzt würden. Nach Norm-Randbedingungen ergibt sich für diese Variante ein Kennwert von 11.300 Kh .

Zwar ist in allen Fällen eine Unzulässigkeit des Raumes bescheinigt worden, die Unterschiede zwischen den Modellierungsvarianten und Randbedingungen sind jedoch erheblich. Es ist daher, sowohl in Bezug auf die Randbedingungen als auch in Bezug auf die Modellabbildung konstruktiver Besonderheiten eine Handlungsempfehlung für die Nachweisführenden erforderlich. Eine große Herausforderung stellen hier Bestandsbauten mit unbekanntem Kennwerten dar, für welche zwar in den meisten Fällen kein gesetzlicher Nachweis, dafür aber eine rechnerische Überprüfung von notwendigen SWS-Verbesserungsmaßnahmen erforderlich ist.

5 Zusammenfassung und Diskussion

Die Verfahren zur Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes sind in ihrer Konzeption für Aufenthaltsräume in Wohngebäuden und Einzelbüros geeignet. Eine Anwendung auf anderweitig genutzte Räume unterliegt strikten Grenzen, die in der Norm klar angegeben werden sollten. Anhand der hier erläuterten Variantenrechnungen wurde deutlich, dass es neben der Nutzung weitere Anwendungsgrenzen gibt, beispielsweise in der Bewertung von Räumen mit Dachflächenfenstern, Glasaufbauten und hohen Räumen. Ferner wurde die Kritik an den nicht für den Sommerfall erarbeiteten und unzureichend differenzierten Klimarandbedingungen in der Literatur angeführt. Diese vermeintliche Vereinfachung

führt sowohl im vereinfachten als auch im simulationsbasierten Normnachweis zu einem unzureichenden Sicherheitszuschlag. In der Simulation bleibt dadurch auch die Abbildung mesoklimatischer Besonderheiten (z. B. Wärmeineffekte im Stadtklima) verwehrt. Grundsätzlich führt die unzureichende Differenzierung der Randbedingungen für den Simulationsnachweis zu einer schlechten Aussagefähigkeit. Auch die fehlenden Qualitätsanforderungen an die Simulationswerkzeuge tragen dazu bei. So gibt es verschiedene Validierungsfälle in nationalen und internationalen Normen, welche einige Basisfälle mit Referenzergebnissen aufführen. Keine davon wurde für die Festlegung von Anforderungen, z. B. in Form zulässiger Abweichungen der Berechnungsergebnisse eines für den SWS verwendeten Verfahrens von den Referenzkennwerten, hinzugezogen. Geeignet wären aktuell auch die SimQuality-Referenzfälle, die eine deutlich größere Band-

breite von Berechnungsfällen abdecken als es die genannten Standards leisten können. Damit im Zusammenhang stehen auch Anforderungen an die Dokumentation der Berechnungsgrundlagen der Verfahren. Der Nachweisführende ist nach aktuellem Stand lediglich an die Benennung des Verfahrens sowie an die Dokumentation der Eingangs- und Ergebnisdaten gebunden. Die Güte der verwendeten Software und die Eignung zur Abbildung spezieller Simulationsfälle können daraus nicht abgeleitet werden. Das große Potenzial von Simulationsrechnungen für den Sommerfall bleibt folglich mit der aktuellen Normfassung der DIN 4108-3:2013 Abschnitt 8.4 ungenutzt. Der Anwender fragt sich zu Recht, warum er den erhöhten Aufwand des Simulationsnachweises auf sich nehmen sollte, wenn die Aussagefähigkeit nicht wesentlich besser als im vereinfachten Verfahren ist.

Literatur

- [1] Lorenz, R.; Stalhandske, Z.; Fischer, E. M. (2019) *Detection of a Climate Change Signal in Extreme Heat, Heat Stress, and Cold in Europe From Observations*. Geophysical Research Letters, vol. 46, 14, pp. 8363–8374.
- [2] Shaw, B. J.; van Vliet, J.; Verburg, P. H. (2020) *The periurbanization of Europe: A systematic review of a multifaceted process*. Landscape and Urban Planning, vol. 196, 103733.
- [3] Sachindra, D. A.; Ng, A. W. M.; Muthukumar, S.; Perera, B. J. C. (2016) *Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: a case-study*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 142, 694, pp. 172–186.
- [4] *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts (Gebäudeenergiegesetz GEG)* (2020). Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 37, S. 1728.
- [5] DIN 4108-2:2013-02 *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.
- [6] Maas, A.; Kempkes, C.; Schlitzberger, S. (2013) *Sommerlicher Wärmeschutz – Neufassung der DIN 4108-2*. Bauphysik 35, H. 3, S. 155–161.
- [7] Schlitzberger, S. (2014) *Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls*. [Dissertation] Kassel: Universitätsbibliothek Kassel.
- [8] Werner, H. (2003) *Sommerlicher Wärmeschutz nach neuer DIN 4108-2 am Beispiel verschiedener Baukonstruktionen*. Bauphysik 25, H. 2, S. 59–64.
- [9] DIN 4108-2:1981 *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.
- [10] DIN 4108-2:2003-07 *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.
- [11] Hauser, G.; Kempkes, C.; Schlitzberger, S. (2006) *Vergleichende Untersuchungen von Standard-Klimadatenansätzen (Testreferenzjahren) mit gemessenen Langzeit-Klimadatenansätzen für den Standort Kassel*. Bauphysik 28, H. 4, S. 221–232.
- [12] Hoffmann, S.; Ganji Kheybari, A. (2021) *Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz – Teil 3: Modellierung komplexer Geometrien und unterschiedlicher Materialeigenschaften von Verschattungssystemen*. Bauphysik 43, H. 3, S. 159–173.
- [13] Windhausen, S.; Schmidt, P. (2021) *Klimadaten als wesentlicher Bestandteil zur Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes*. Bauphysik 43, H. 3, S. 154–158.
- [14] Freudenberg, P. (2016) *Entwicklung und Kalibrierung einer Planungsmethode für Nichtwohngebäude mit besonderen raumklimatischen Anforderungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [15] Krähenmann, D. (2017) *Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Ein Gemeinsames Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)*, Offenbach: Online-Publikation, 46 S.
- [16] DWD (Deutscher Wetterdienst), BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) [Hrsg.] (2017) *Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY 2017) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse*. BBSR. <https://www.bbsr.bund.de> [Zugriff: 10. November 2021].
- [17] Schünemann, C.; Ziemann, A.; Goldberg, V.; Ortlepp, R. (2020) *Urban climate impact on indoor overheating – a model chain approach from urban climate to thermal building simulation*. In: Zilahy, Gyula [Eds.]: Sustainability in Transforming Societies. Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Sustainable Development Research Society (ISDRS), 15–17 July 2020, Budapest, Hungary. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 723–734.
- [18] Fahrion, M.-S.; Nickl, C.; Bangalore, D.; Lakatos, M.; Brombacher, M. (2021) *Sommerlicher Wärmeschutz durch die Begrünung von Außenanlagen und Gebäuden*. Bauphysik 43, H. 5, S. 291–302.
- [19] Hoffmann, S.; Kheybari, A. G. (2021) *Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz – Teil 1: Vergleich der Nachweisverfahren unter Berücksichtigung zukünftiger Klimadaten*. Bauphysik 43, H. 1, S. 27–35.
- [20] Mourkos, K.; McLeod, R. S.; Hopfe, C. J.; Goodier, C.; Swainson, M. (2020) *Assessing the application and limitations of a standardised overheating risk-assessment methodology in a real-world context*. Building and Environment, 181, 107070.

- [21] Nicolai, A.; Hirth, S.; Madjidi, M. (2021) *SimQuality – A novel test suite for dynamic building energy simulation tools*. In: Laverge, Saelens [Eds.] 17th IBPSA International Conf. Building Simulation, Brugge.
- [22] Budny, O. (2021) *Erörterung, Vergleich und Kritik vorhandener Nachweisverfahren zum sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden* [Diplomarbeit]. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik.
- [23] Kotte, L. (2022) *Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung des Sommerlichen Wärmeschutzes für den Lesesaal des Stadtarchivs in Dresden* [Projektarbeit]. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik.
- [24] Nicolai, A.; Fechner, H.; Freudenberg, P. (2021) *Therakles – Das Thermische Raummodell*. C++, QT, Dresden: Bauklimatik-Dresden. <https://bauklimatik-dresden.de>
- [25] Weiß, D.; Hirth, S.; Nicolai, A.; Nouri, A.; Agudelo, J.; Rolffs, R. (2020) *SimQuality*. <https://simquality.e3d.rwth-aachen.de>
- [26] Hellwig, R.; Steiger, S. (2011) *Hybride Lüftungssysteme für Schulen* (Forschungsbericht No. RKB 029/2010/291-K). Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [27] VDI 2078:2015-06 *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*.
- [28] Freudenberg, P.; Ruisinger, U.; Stöcker, E. (2017) *Calibration of Hygrothermal Simulations by the Help of a Generic Optimization Tool*. Energy Procedia 132, pp. 405–410.

Autorinnen

Dr.-Ing. Peggy Freudenberg (Korrespondenzautorin)
peggy.freudenberg@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Bauklimatik
Professur für Technischen Ausbau und Klimagerechtes Bauen
01062 Dresden

Dipl.-Ing. Oda Budny
oda.budny@posteo.de
Technische Universität Dresden
Institut für Bauklimatik
Professur für Technischen Ausbau und Klimagerechtes Bauen
01062 Dresden

Zitieren Sie diesen Beitrag

Freudenberg, P.; Oda, B. (2022) *Grenzen der Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013*. Bauphysik 44, H. 1, S. 29–39. <https://doi.org/10.1002/bapi.202100044>