Sommerlicher Wärmeschutz

Kurzbericht

Anforderungswerte zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes unter Verwendung einer dynamisch-thermischen Gebäudesimulation im Projet de règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments (PRGD)

Dr.-Ing. Markus Lichtmeß, M.Sc. Christophe Armborst

Goblet Lavandier & Associés, Luxemburg

Luxemburg, 10. Dezember 2020
Version 1.7

Inhalt

1. Einleitung ... 3
2. Beschreibung der betrachteten Räume und Varianten ... 4
2.1. Standard-Raum Wohngebäude (WG) ... 4
2.2. Standard-Raum Nichtwohngebäude (NWG) ... 5
2.3. Variantenausprägungen (WG & NWG) ... 6
3. Berechnungsmodelle ... 7
3.1. Leistungsbilanzierung ohne Nachtlüftung ... 10
3.2. Leistungsbilanzierung mit Nachtlüftung ... 11
3.3. Aggregierte Leistungsbilanz ... 13
3.4. Anmerkungen zu den Modellen ... 13
3.5. Mögliche Bewertungsgrößen ... 13
3.5.1. Anzahl der Übertemperaturstunden ... 14
3.5.2. Übertemperaturgradstunden ... 14
3.5.3. Überschreitungshäufigkeit der Komfortklassen nach EN 15251 ... 14
3.6. Vergleich der Ergebnisse zum Berechnungsverfahren ... 15
4. Anforderungswerte für das Nachweisverfahren ... 19
4.1. Einfluss der Nutzungszeiten und des Bezugszeitraums ... 19
4.2. Randbedingungen zur Lüftung ... 21
4.2.1. Einfluss der Berücksichtigung einer Wärmerückgewinnung ... 22
4.2.2. Ausprägung erhöhter Tag- und Nachtluftwechsel ... 23
4.3. Auswertung und Ableitung Anforderungswert ... 24
4.4. Anwendbarkeit des vereinfachten Verfahrens ... 25
5. Schlussfolgerungen ... 26
6. Literaturverzeichnis ... 28
7. Anhang ... 30

1. Einleitung

Neben dem winterlichen Wärmeschutz ist auch der sommerliche Wärmeschutz ein Kriterium für die Energieeffizienz von Gebäuden und den thermischen Raumkomfort. In Luxemburg werden seit Inkrafttreten der entsprechenden Verordnungen für alle neuen Gebäude dahingehend Anforderungen gestellt (1), (2). Das im *„Règlement grand-ducal du 31 août 2010 concernant la performance énergétique des bâtiments fonctionells et modifiant“* (im Folgenden RGD) vereinfachte Verfahren beruht auf der Bewertung der solaren Durchlässigkeit t_S. Dabei werden die transparenten Flächen in Bezug auf die Raumgeometrie bewertet – unter Berücksichtigung von Bauschwere, dem Energiedurchlassgrad der Verglasung und der Effizienz von Sonnenschutzsystemen. Das Verfahren wurde in Anlehnung an DIN 4108-2:2003-07 entwickelt und für die zügigere Bewertung vereinfacht.

Mit steigender Energieeffizienz (Wärmeschutz und Luftdichtheit der Gebäude) und auch infolge des Einsatzes einer kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung (im Folgenden WRG) nimmt die Entspeicherfähigkeit der Gebäude geringfügig ab, wenn im Sommer nicht über Fenster gelüftet wird. Grundsätzlich muss über den Tag einfallende Wärmeenergie wieder abgeführt werden, um gerade auch in längeren andauernden Hitzeperioden eine Überwärmung zu begrenzen. Das sommerliche Verhalten von Gebäuden rückt also stärker in den Vordergrund – nicht zuletzt auch mit der voraussichtlichen Zunahme von wärmeren Sommern in unseren Breitengraden.

Bisher konnte, neben dem vereinfachten Verfahren, auch eine dynamisch-thermische Simulationsrechnung verwendet werden, um die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nachzuweisen. Die für die Berechnung zu verwendeten Randbedingungen sind in der Neuauflage der DIN 4108-2:2013-02 (3) beschrieben, auf die im aktuellen Reglement verwiesen wird (1). Allerdings sind die dort angesetzten Simulationsrandbedingungen zu überprüfen. Für ein einfaches Nachweisverfahren können diese ausreichend sein, es kann aber dazu führen, dass im individuellen Fall der thermische Komfort nicht ausreichend ist. Für verschiedene Anwendungsfälle ist nach DIN 4108-2:2013-02 das vereinfachte Verfahren auch nicht zulässig und der Nachweis ist über eine dynamisch-thermische Simulationsrechnung zu erbringen. Dafür wurden im Anhang der DIN 4108-2:2013-02 erforderliche Randbedingungen definiert. In bestimmten Fällen kann z.B. für die Nachtlüftung pauschal ein bis zu 5-facher und für die Taglüftung ein 3-facher Luftwechsel angesetzt werden, sofern eine Möglichkeit einer Fensterlüftung besteht oder der Luftwechsel über eine Lüftungsanlage ausreichend hoch ist. Die Simulationsrandbedingungen sind für das Nachweisverfahren festgelegt worden und die darüber bestimmten Raumtemperarturen können sich von realen Gegebenheiten unterscheiden – insbesondere auch in effizienten Gebäuden. Das mögliche Berechnungsverfahren ist, bis auf die Angabe, dass es sich um eine dynamisch-thermische Simulationsrechnung handelt, nicht näher definiert. Neben der dynamisch-thermischen Gebäudesimulation existieren auch weitere Berechnungsmodelle (in der Regel sind das Widerstands-Kapazitäten-Modelle, RC-Netzwerk) mit denen über ein einfaches Stundenverfahren ebenfalls Raumtemperaturen bewertet werden können. Diese Modelle sollen in der kommenden Verordnung *„Projet de règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments modifiant“* (im Folgenden PRGD) explizit zulässig sein (4).

Mit dem kommenden PRGD sollen Berechnungsrandbedingungen und Anforderungswerte, die einen besseren Praxisbezug aufweisen und darüber hinaus auch Präzisionen eingeführt werden, mit welchen Verfahren der Nachweis erbracht werden kann (4). Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Raumkonfigurationen in einer Parameterstudie bewertet. Das Ziel ist zum einen die Überprüfung der Anwendbarkeit von einfacheren Rechenmodellen (RC-Netzwerk) im Vergleich zu dynamisch-thermischen Simulationsrechnungen und zum anderen die Überprüfung und Festlegung von Anforderungswerten für den sommerlichen Wärmeschutz im Neubau für das PRGD.

2. Beschreibung der betrachteten Räume und Varianten

Zur Bewertung und Validierung des Nachweisverfahrens wird für Wohn- (im Folgenden WG) und Nichtwohngebäude (im Folgenden NWG) jeweils ein Standard-Raum definiert. Durch die Variation der Randbedingen des Standard-Raums (Bauschwere, Verglasungsanteil, Sonnenschutz, Nachtlüftung, etc.) wird eine Vielzahl von Varianten erzeugt, an denen das Nachweisverfahren evaluiert werden kann.

2.1. Standard-Raum Wohngebäude (WG)

Beschreibung der Randbedingungen und des Standard-Raums für Wohngebäude:

Gebäudegröße:	A_n =200 m²
Betrachteter Raum:	
Raumbreite:	7 m
Raumtiefe:	5 m
Raumfläche:	A_{NGF} = 7 m x 5 m = 35 m²
Raumhöhe:	3 m

Es wird ein innenliegender Raum mit nur einer Außenwand (mit Fenstern) abgebildet. Die Gesamtfläche der Außenwand inkl. Fenster beträgt 7 m x 3 m = 21 m². Alle anderen Bauteile werden als Innenflächen (3 x Innenwände, 1 x Fußboden und 1 x Decke) und somit als adiabat angenommen.

Personenbelegung:	65,1 m²/Person (gemäß (4))
Allgemeinstrombedarf:	14,8 kWh/(m²a) (gemäß (4))
Rahmenanteil Fenster:	25% (75% Verglasung)
Luftdichtheit:	n_{50} = 0,60 1/h
Lüftung:	LW = 0,30 1/h (durchgehend) WRG = 75 % Bypass der WRG bei T_a > 15°C
Raumsolltemperaturen:	Heizen = 21 °C | keine aktive Kühlung
Wetterdatensatz:	Luxemburg (Meteonorm 8)

2.2. Standard-Raum Nichtwohngebäude (NWG)

Beschreibung der Randbedingungen und des Standard-Raums für Nichtwohngebäude:

Gebäudegröße:	A_n = 2.750 m²
Betrachteter Raum:	
Raumbreite:	7 m
Raumtiefe:	5 m
Raumfläche:	A_{NGF} = 7 m x 5 m = 35 m²
Raumhöhe:	3 m

Es wird ein innenliegender Raum mit nur einer Außenwand (mit Fenstern) abgebildet. Die Gesamtfläche der Außenwand inkl. Fenster beträgt 7 m x 3 m = 21 m². Alle anderen Bauteile werden als Innenflächen (3x Innenwände, 1x Fußboden und 1x Decke) und somit als adiabat angenommen. Lediglich bei der Variante FE70 wird ein Eckraum (2 Außenwände) abgebildet, wobei die Gesamtfläche der Außenwand inkl. Fenster (7 m + 5 m) x 3 m = 36 m² beträgt.

Personenbelegung:	20 m²/Person (gemäß (4))
Allgemeinstrombedarf:	20 kWh/(m²a) (gemäß (4))
Rahmenanteil Fenster:	25% (75% Verglasung)
Luftdichtheit:	n_{50} = 0,60 1/h
Lüftung:	LW = 1,33 1/h in der Nutzung (+ eine Stunde Vor- und Nachlauf) LW = 0,24 1/h außerhalb der Nutzung WRG = 75 % Bypass der WRG bei T_a > 15°C
Raumsolltemperaturen:	Heizen = 21 °C | keine aktive Kühlung
Wetterdatensatz:	Luxemburg (Meteonorm 8)

2.3. Variantenausprägungen (WG & NWG)

Für die Festlegung der Dämmstandards werden 2 Wärmeschutzklassen definiert. Diese sind angelehnt an die Luxemburger Wärmeschutzklassen A und D. Die Fensterorientierung ist Süd.

- Dämmstandard (in Anlehnung an RGD)
  - AW U_A = 0,13 W/(m²K) U_D = 0,27 W/(m²K)
  - FE U_A = 0,84 W/(m²K) U_D = 1,36 W/(m²K)
  - WB U_A = 0,03 W/(m²K) U_D = 0,05 W/(m²K)
- Bauweise/Speichermasse
  - BL: Leichte Bauweise: 33 Wh/(m²K)
  - BM: Mittlere Bauweise: 62 Wh/(m²K)
  - BS: Schwere Bauweise: 97 Wh/(m²K)
- Fensterflächenanteil bezogen auf A_{NGF}
  - WG:
    - FE15: 15% von A_{NGF} A_{FE} = 15% · 35 m² = 5,25 m²
      A_{AW} = 21 m² - 5,25 m² = 15,75 m²
    - FE25: 25% von A_{NGF} A_{FE} = 25% · 35 m² = 8,75 m²
      A_{AW} = 21 m² - 8,75 m² = 12,25 m²
    - FE35: 35% von A_{NGF} A_{FE} = 35% · 35 m² = 12,25 m²
      A_{AW} = 21 m² - 12,25 m² = 8,75 m²
  - NWG:
    - FE30: 30% von A_{NGF} A_{FE} = 30% · 35 m² = 10,5 m²
      A_{AW} = 21 m² - 10,5 m² = 10,5 m²
    - FE50: 50% von A_{NGF} A_{FE} = 50% · 35 m² = 17,5 m²
      A_{AW} = 21 m² - 17,5 m² = 3,5 m²
    - FE70: 70% von A_{NGF} A_{FE} = 70% · 35 m² = 24.50 m²
      A_{AW} = 36 m² - 24,5 m² = 11,5m² [1]
- Energiedurchlassgrade Verglasung
  - G007: g = 0,50 | g_{tot} = 0,07 für Klasse A
    g = 0,60 | g_{tot} = 0,08 für Klasse D (F_C = 0,14)
  - G010: g = 0,50 | g_{tot} = 0,10 für Klasse A
    g = 0,60 | g_{tot} = 0,12 für Klasse D (F_C = 0,20)
- Sonnenschutzsteuerung:
  - I250: ab 250 W/m²
  - I200: ab 200 W/m²
  - I150: ab 150 W/m²
- Nachtauskühlung:
  - NL0: keine
  - NL1: 1%, wirksame Fensteröffnungsfläche bezogen auf A_{NGF}, angelehnt an (4).

[1] Für FE70 wird ein Eckraum abgebildet: Die Gesamtfläche der Außenwand inkl. Fenster beträgt dann (7 m + 5 m) x 3 m = 36 m².

Kodierung der Varianten

Um die betrachteten Varianten eindeutig zuordnen zu können, wurde eine Kodierung der oben beschriebenen Varianten vorgenommen, die an folgendem Beispiel erläutert wird.

Beispiel: NWG - A_BM_OS_FE30_G010_I250_NL0

NWG:	NWG Nichtwohngebäude
A:	Dämmstandard A
BM:	mittlere Bauweise: 62 Wh/(m²K)
OS:	Fensterorientierung nach Süden
FE30:	Fensterfläche bezogen auf A_{NGF} : 30% · 35 m² = 10,5 m²
G010:	g = 0,5 | g_{tot} = 0,10
I250:	ab 250 W/m²
NL0:	keine Nachtauskühlung

3. Berechnungsmodelle

Mit dem PRGD werden neben der dynamisch-thermischen Gebäudesimulation auch andere Rechenverfahren zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes angegeben. Die folgende Analyse zeigt einen kurzen Vergleich zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse, wenn mit den unterschiedlichen Rechenmodellen gearbeitet wird.

Dynamisch-thermische Simulation als Referenzmodell

Die genauesten Ergebnisse können mit einer dynamisch-thermischen Gebäudesimulation erzielt werden. Für die dynamisch-thermische Bewertung wird die Software *IDA ICE 4.8* von *EQUA Simulation AB* verwendet. Die hinterlegten physikalischen Modelle entsprechen dem neuesten wissenschaftlichen Stand und sind gut validiert. Das Programm berechnet die Energiebilanzen mit variablen Zeitschritten. Die Algorithmen und die Simulationsparameter können zum Großteil frei programmiert werden. Dieser Freiheitsgrad steigert die Flexibilität, aber auch die fachlichen Anforderungen, um ein Simulationsmodell zu erstellen.

Semi-dynamisches Modell

Bei teil- oder semi-dynamischen Modellen werden Vereinfachungen in der Berechnung eingeführt, um insbesondere den gekoppelten Wärmedurchgang von Bauteilen (Wärmeleitung und -speicherung) zu bestimmen. Diese Vereinfachungen führen naturgemäß zu physikalisch weniger genauen Ergebnissen, die allerdings für den vorgesehenen Anwendungszweck ausreichend sein können. Die Berechnung der Bewertungsgrößen und der einzuhaltenden Grenzwerte für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erfolgt mithilfe des Programms *SimRoom Version 3*. *SimRoom* verwendet unter anderem auch die im PRGD zulässigen Rechenregeln mit dem vereinfachten Stundenverfahren. Das Berechnungsmodell von *SimRoom* wurde für diesen Vergleich mit der *IDA ICE 4.8* verglichen. In *SimRoom* sind 2 verschiedene Bilanzmodelle (Modell 1 (DGL) und Modell 2 (R5C1)) integriert und in den Modellen werden die folgenden Einflussfaktoren berücksichtigt.

- Wärmedämmung des Gebäudes (Isolierung, Wärmebrücken, etc.);
- Wärmekapazität der Bauteile (innere Gebäude- und Bauteilstruktur);
- Lüftung (Infiltration, Luftwechsel (Fenster und RLT-Anlagen), Wärmerückgewinnung);
- Erhöhter Nacht-Fensterluftwechsel im Fall der passiven Nachtauskühlung;
- Erhöhter Tages-Fensterluftwechsel zur Verringerung der Überwärmung;

- Interne Gewinne durch Beleuchtung, Personen und Geräte;
- Energiegewinne durch Sonneneinstrahlung (Fenster und opake Außenbauteile);
- Verschattung infolge horizontaler Verbauung, Überhänge und Seitenblenden;
- Sonnenschutz und dessen Aktivierung in Abhängigkeit der Einstrahlungsintensität und der Außenlufttemperatur;
- Zeitlich differenzierte Nutzungsprofile für Tag- und Nachtlüftung und interne Gewinne;
- Stündliche Wetterdaten für Strahlung, Wind und Außenlufttemperatur;
- Berücksichtigung des Jahresverlaufs der Erdreichtemperatur, usw.

Modell 1 (DGL)

Das erste Verfahren (DGL) entspricht einem semi-dynamischen Modell, mit dem das energetische Verhalten abgebildet werden kann. Die stündliche Raumtemperatur und die erforderliche Heiz- und/oder ggf. Kühlleistung $Q_{h/k}$ des Raumes/Zone wird mithilfe eines 1-Knoten-Gebäude-Modells erster Ordnung bestimmt. Vereinfacht werden Wärmespeicherung und Wärmeleitung in Bauteilen getrennt voneinander bewertet. Für das Gebäude-Modell erster Ordnung gilt die, bereits passend umgeformte und erweiterte, Bilanzgleichung in Anlehnung an (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12).

$$C \cdot \frac{dT_i(t)}{dt} = -H_{t/l} \cdot T_i(t) + Q_{s/l/c/i} + Q_{h/k}$$

wobei:

$H_{t/l}$	spezifischer Wärmeverlust infolge Transmission und Lüftung; [W/K]
T_i	Raumtemperatur, [°C]
$Q_{s/l/c/i}$	Energiestrom infolge kurzwelliger solarer Einstrahlung (s), über Lüftung (l), über Bauteile (c) und interne Gewinne (i); [W]
$Q_{h/k}$	Energiestrom des technischen Systems (Heiz-/Kühlleistung); [W]
C	Wärmespeicherfähigkeit der Raumluft und der relevanten Bauteile; [J/K]

Die Berechnung erfolgt im Stundenzeitschritt. Das bedeutet, dass die Knotentemperatur am Ende einer Stunde bestimmt wird. Dies erfolgt unter der Annahme, dass sich die Randbedingungen im Laufe einer Stunde nicht ändern. Die Differenzialgleichung reduziert sich damit auf eine inhomogene, lineare Differenzialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Da im Modell erster Ordnung nicht zwischen konvektiver und radiativer Energieabgabe unterschieden werden kann, entspricht die angegebene Raumtemperatur T_i einer mittleren Knotentemperatur, die der Temperatur der Gebäudestruktur entspricht (~operative Raumtemperatur). Die Lufttemperatur selbst kann nicht berechnet werden. Diese Differenzialgleichung kann wie folgt für den Zeitschritt t = 1 Stunde gelöst werden.

$$T_{i(n)} = T_{i(n-1)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{Q_{s/l/c/i} + Q_{h/k}}{H_{t/l}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Wobei die Zeitkonstante τ die thermische Trägheit des Systems und somit dessen Reaktionszeit beschreibt. Je größer die thermische Trägheit des Systems ist, desto länger braucht das Gebäude um sich aufzuheizen oder um auszukühlen. (7)

$$\tau = \frac{C}{H_{t/l}}$$

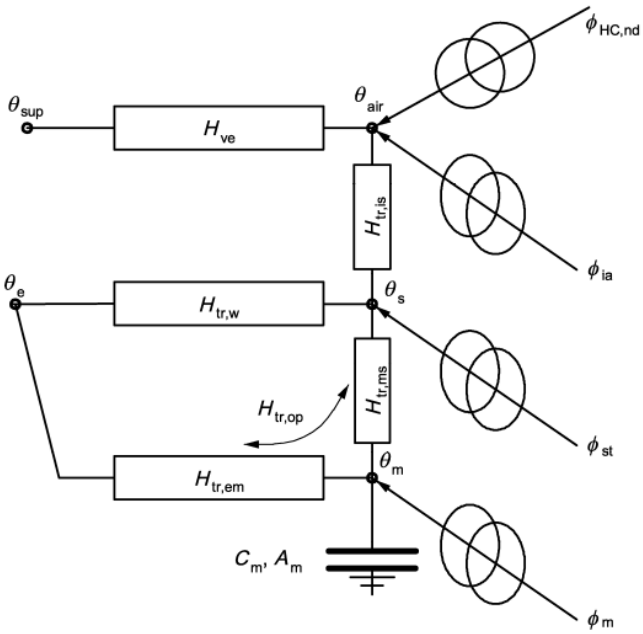
mit:

τ	Zeitkonstante des Systems, [h]
$T_{i(n)}$	Raumtemperatur in der Berechnungsstunde (n), [°C]
$T_{i(n-1)}$	Raumtemperatur der vorigen Stunde (n-1), [°C]

Die Gleichung kann nach der Heiz- und Kühlleistung $Q_{h/k}$ umgestellt werden. Dadurch erhält man die erforderliche Leistung, um das Gebäude innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs zu halten (z.B. >21°C im Heizfall und <25 °C im Kühlfall).

Modell 2 (R5C1)

Dieses Modell nutzt als Grundalgorithmus das vereinfachte Stundenverfahren aus EN ISO 13790:2008-09, Anhang C bzw. EN ISO 13792:2005, Anhang A. Das Modell wurde für *SimRoom* umfangreich erweitert, um zum Beispiel den Einfluss einer natürlichen Fensterlüftung einzubeziehen. Die EN ISO 13790:2008-09 wurde durch EN ISO 52016-1 und EN ISO 52017-1 ersetzt. Mit der überarbeiteten Version in der 52er Normreihe werden die dynamischen Verhältnisse detaillierter abgebildet, allerdings steigt damit der zeitliche Berechnungsaufwand stark an und die direkte Nachvollziehbarkeit ist nicht mehr so einfach gegeben.



Für das R5C1-Verfahren liegen viele Vergleichsrechnungen und/oder Validierungen vor, die eine Aussage zur Genauigkeit des Verfahrens machen (13), (14), (15) (16), (17), (18), (19), (20), (21) (22), (23). Auch gibt es derzeit am Markt nur eine überschaubare Anzahl verfügbarer Software, die auf den Ansatz der 52er Normversion zurückgreifen. Der grundlegende Berechnungsansatz aus EN ISO 13790 kann daher als einfache und leicht nachvollziehbare Methode herangezogen werden. Folgendes Bild zeigt schematisch das RC-Netzwerk als Berechnungsgrundlage.

Abbildung 3.1: Wärmeströme im RC-Netz gemäß EN ISO 13790:2008, Anhang C, Bild aus (24).

Für die folgenden Vergleichsrechnungen wird, im Fall der Bewertung mit *SimRoom* das auf normative Vorgaben basierende R5C1-Modell verwendet. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse von *SimRoom* und mit denen aus einer dynamisch-thermischen Gebäudesimulation mit *IDA ICE* gegenübergestellt.

3.1. Leistungsbilanzierung ohne Nachtlüftung

Abbildung 3.2 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse von *IDA ICE* und *SimRoom* am Beispiel der Leistungsbilanz und des Temperaturverlaufs einer Variante im Monat Juli. Wie zu erkennen ist, stimmen die Ergebnisse der Leistungsbilanz (Wärmegewinne und -verluste) der zwei Modelle gut überein. Die leichten Abweichungen in Bezug auf den Verlauf der Raumtemperatur sind u.a. auf die unterschiedlichen Modellansätze zur Berücksichtigung der Speichermasse zurückzuführen.

Die Leistungsbilanz zeigt, dass nur ein verhältnismäßig geringer Anteil des Wärmeüberschusses über Transmission (dunkel-blaue Kurve) abgeführt werden kann. Der größte Anteil des Wärmeüberschusses wird über lüftungsinduzierte Wärmeströme (Infiltration und mechanische Lüftung) abgeführt (hell-blaue Kurve). Die Infiltration hat hierbei allerdings nur einen verhältnismäßig geringen Einfluss. Dies ist am Verlauf der Lüftungswärmeströme außerhalb der Nutzungszeiten (nachts und an den Wochenenden) gut zu erkennen ist, da der Luftwechsel durch die mechanische Lüftung in diesen Zeitfenstern stark reduziert ist. Am Verlauf der durch die Lüftung induzierten Wärmeströme (hell-blaue Kurve) ist ebenfalls der Einfluss des Bypass-Betriebs der Wärmerückgewinnung der RLT-Anlage gut zu erkennen. Durch den Bypass-Betrieb, der in den Modellen bei Außentemperaturen > 15°C aktiviert wird, kann die Abführung überschüssiger Wärme erhöht werden und somit das Überhitzungsrisiko reduziert werden.

Abbildung 3.2: Leistungsbilanz und Temperaturverlauf der Variante NWG - A_BS_OS_FE30_G010_I150_NL0 im Monat Juli; oben: IDA ICE , unten: SimRoom.

3.2. Leistungsbilanzierung mit Nachtlüftung

Gemäß dem PRGD (4) kann für die energetische Bewertung von Gebäuden im Energiepass im Fall der passiven Kühlung eine Fensterlüftung berücksichtigt werden. Das Verfahren dazu ist in (25) beschrieben. Dort sind typische, auf die Nettogrundfläche bezogene, geometrische Fensteröffnungsanteile angegeben (Standard 2 %), die für die Berechnung verwendet werden können. Gemäß der Planungsgrundlage der Luxemburger *Verwaltung für öffentliche Bauten* sind für Schulen etwa 3 % der Bodenfläche als geometrische Lüftungsöffnung vorgegeben (26). Neben der Höhe des Luftwechsels, spielt auch die Dauer der Lüftung eine entscheidende Rolle. Bei eher kleineren Fensteröffnungen ergeben sich dadurch längere Öffnungszeiten und mit steigender Fensterfläche entsprechend kürzere. Folgende Bilder zeigen diesen Zusammenhang als Ergebnis einer Jahressimulation für einen beispielhaften Raum. Der mögliche Luftwechsel steigt mit der Fensterfläche (bei gleichen Randbedingungen wie Innen-/Außentemperatur und Windbedingungen). Die Anzahl der Stunden im Jahr, während denen die Nachtlüftung aktiv ist, reduziert sich dabei mit der Größe der Fensteröffnungen. Das rechte Bild zeigt diesen Zusammenhang als aggregierte Luftwechselstunden. Ab etwa 1 % Fensteröffnungsfläche steigen die effektiven Luftwechselstunden weniger steil an.

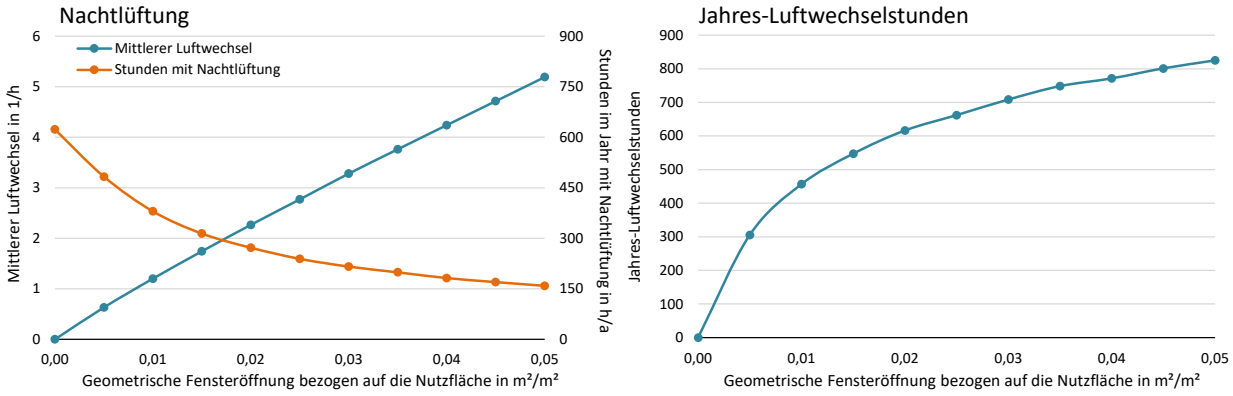


Abbildung 3.3: Von der Fensteröffnungsfläche abhängiger Luftwechsel und Lüftungsdauer (links) und aggregierte Jahres-Luftwechselstunden in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche (rechts), berechnet mit SimRoom.

Für alle folgenden Simulationsrechnungen wird eine **konservative** Öffnungsfläche von 1 % angenommen (Drehfenster) und für die Aktivierung werden folgende Kriterien definiert.

- Aktivierung der Nachtlüftung falls $T_{i,Luft}$ > 24 °C und $T_{Außen}$ > 12 °C und ΔT > 2 K.

Bei einer passiven Fensterlüftung ist der Luftwechsel wesentlich abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Außenluft. In Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 wird für 2 Varianten (NWG & WG) der mittlere stündliche Luftwechsel dargestellt, der sich bei einer wirksamen Öffnungsfläche von 1 % bezogen auf die Raumfläche einstellt. In den beiden Graphen werden sowohl die Simulationsergebnisse von *IDA ICE* als auch von *SimRoom* dargestellt. Hierfür wurde in *IDA ICE* ein detailliertes geometrisches Fensteröffnungsmodell implementiert. Im Allgemeinen zeigt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung der beiden Modelle. Die etwas niedrigeren Luftwechselraten bei *SimRoom* lassen sich durch den hier pauschal angesetzten Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung eines Insektenschutzgitters erklären. In den Grenzbereichen der Fensteröffnung und -schließung weisen die Simulationsergebnisse von *IDA ICE* einige Ausreißer mit einem geringeren mittleren stündlichen Luftwechsel auf. Das liegt daran, dass *IDA ICE* mit kürzeren Zeitschritten von weniger als einer Stunde rechnet. Bei den Ausreißern handelt es sich um Stunden, in denen das Fenster nicht durchgehend geöffnet ist, was sich in einem niedrigeren stündlichen Mittelwert des Luftwechsels widerspiegelt.

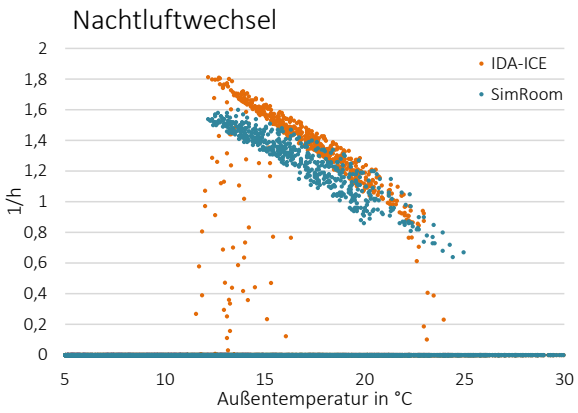


Abbildung 3.4: Berechneter Nachtluftwechsel für NWG - A_BS_OS_FE30_G010_I150_NL1 (Nichtwohngebäude) mit IDA ICE und SimRoom.

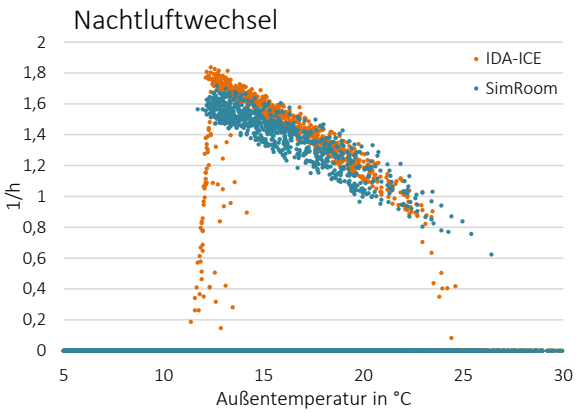


Abbildung 3.5: Berechneter Nachtluftwechsel für WG - A_BS_OS_FE24_G010_I250_NL1 (Wohngebäude) mit IDA ICE und SimRoom.

Abbildung 3.6 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse von *IDA ICE* und *SimRoom* am Beispiel der Leistungsbilanz und des Temperaturverlaufs einer Variante im Monat Juli. Bei dieser Variante wird in beiden Modellen eine Fensternachtlüftung berücksichtigt, deren Einfluss an den nächtlichen Leistungsspitzen im Verlauf der lüftungsinduzierten Wärmeströme (hell-blaue Kurve) gut zu erkennen ist. Es kann eine tendenziell gute Übereinstimmung der Leistungsbilanzierung und der Ausprägungen der beiden Simulationsmodelle festgestellt werden.

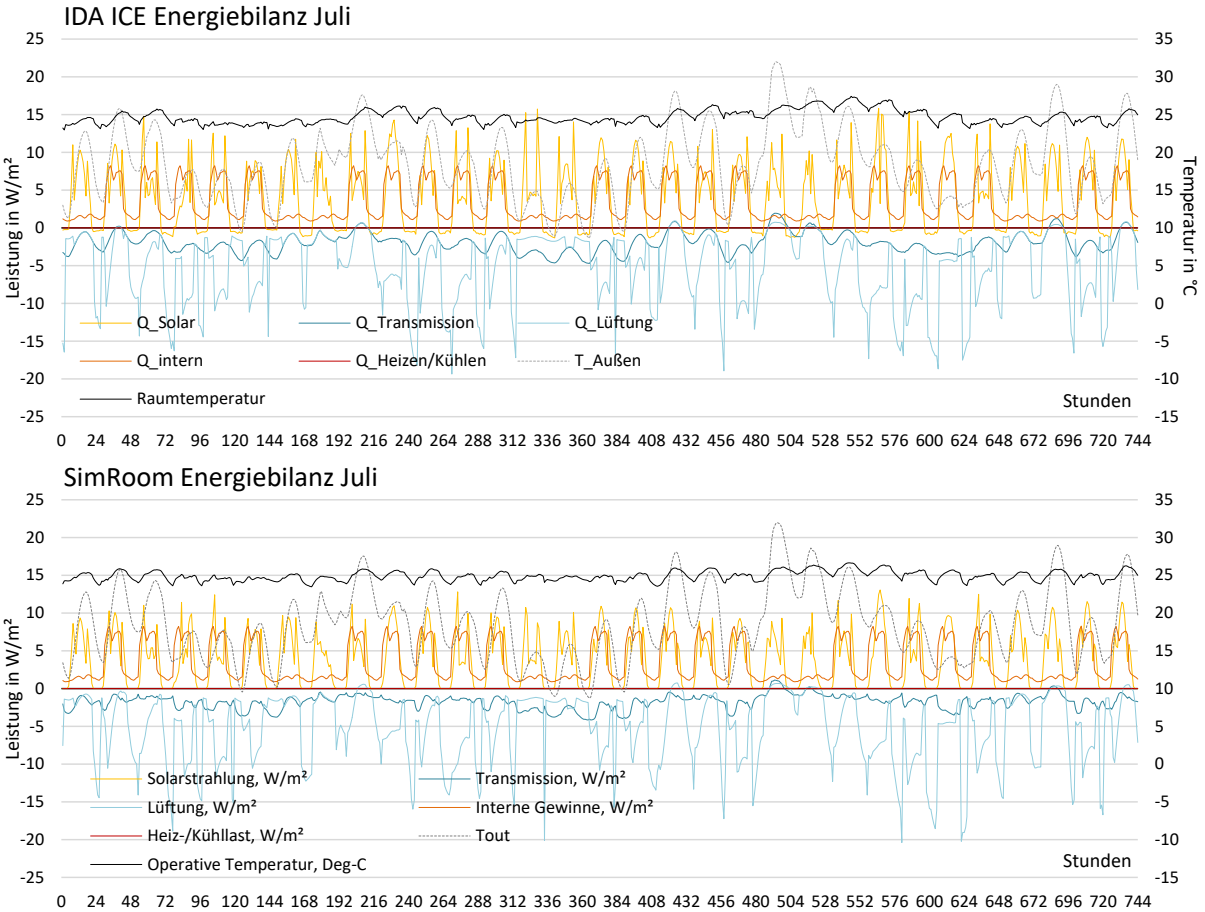


Abbildung 3.6: Leistungsbilanz und Temperaturverlauf der Variante NWG - A_BS_OS_FE30_G010_I150_NL1 im Monat Juli; oben: IDA ICE , unten: SimRoom.

3.3. Aggregierte Leistungsbilanz

Folgendes Bild zeigt die Leistungen für Transmission, Lüftung, solare und interne Gewinne als Summenwert für eine Variante für den Monat Mai. Im Anhang 7 sind alle Monate einzeln aufgeführt. Betrachtet man die Verläufe der Monate, so kann eine in der Tendenz ausreichend gute Übereinstimmung bei der Leistungsbilanzierung und bei den Ausprägungen festgestellt werden.

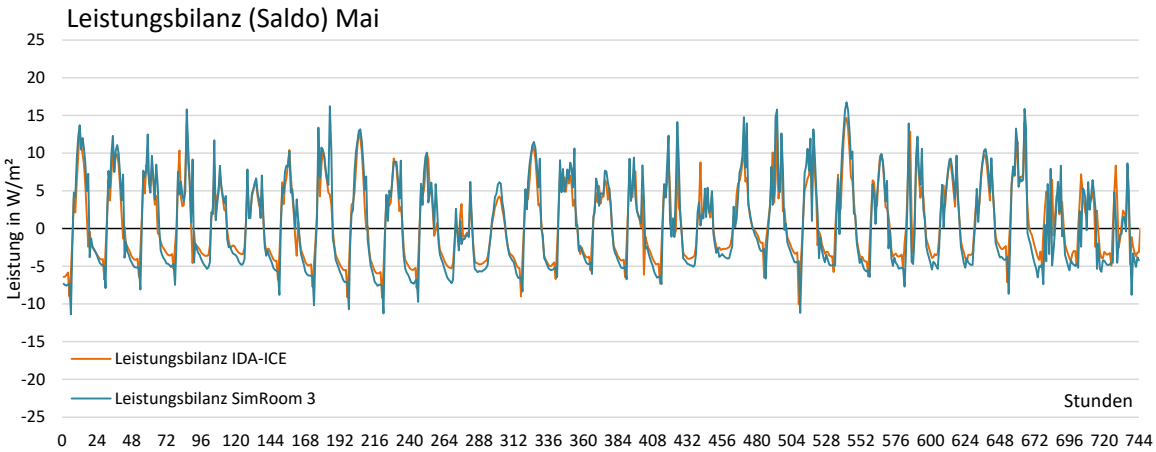


Abbildung 3.7: Leistungsbilanz der Variante NWG - A_BS_OS_FE30_G010_I150_NL0 für den Monat Mai.

3.4. Anmerkungen zu den Modellen

Da gerade bei der dynamisch-thermischen Simulation sehr viele Parameter vom Nutzer festzulegen sind und sich die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren auch unterscheiden, bedarf es einer großen Sorgfalt, die Berechnungsmodelle von den getroffenen Annahmen und Randbedingungen her möglichst gut abzugleichen, damit auch die Ergebnisse vergleichbar sind. Das ist im Fall der dynamisch-thermischen Simulation, je nach verwendetem Programm, deutlich aufwändiger. Für die Vergleichsrechnung wurden derselbe Klimadatensatz und die relevanten Parameter dahingehend angeglichen. Ein vollständiger Abgleich aller Berechnungsbedingungen und Berechnungsparameter ist oft nur schwer möglich. Dieser Sachverhalt muss immer bei der Interpretation von Vergleichsrechnungen berücksichtigt werden.

3.5. Mögliche Bewertungsgrößen

Für das Nachweisverfahren des sommerlichen Wärmeschutzes kommen folgende drei Kenngrößen als Bewertungsgröße in Frage.

1. **Anzahl der Übertemperaturstunden (aktuell im RGD und PRGD)**
   z.B. Prozentsatz der Stunden > 26°C in %

2. **Übertemperaturgradstunden (DIN 4108-2:2013-02)**
   z.B. Übertemperaturgradstunden > 26°C in Kh/a

3. **Überschreitungshäufigkeit der Komfortklassen (EN 15251, adaptives Modell)**
   z.B. Überschreitungshäufigkeit der Komfortklasse II in %

3.5.1. Anzahl der Übertemperaturstunden

Die Anzahl der Übertemperaturstunden enthält keine Information über die Höhe der Temperaturüberschreitungen. Bei einem Grenzwert von 26°C würde bspw. ein Stundenwert von 26,1°C genauso stark ins Gewicht fallen, wie ein berechneter Stundenwert von 30°C. Hierdurch ist eine objektive Bewertung der Überhitzungsgefahr anhand eines einzelnen Grenzwertes nur bedingt möglich, da die Höhe der Überschreitung nicht berücksichtigt wird.

3.5.2. Übertemperaturgradstunden

In DIN 4108-2:2013-02 werden Anforderungen an Übertemperaturgradstunden gestellt (3). Bei den Übertemperaturgradstunden geht neben der Überschreitung eines definierten Temperaturgrenzwertes auch die die Höhe der Temperaturüberschreitungen in den Kennwert mit ein. Durch die Gewichtung der Temperaturüberschreitungen ermöglicht diese Kenngröße eine präzisere Bewertung der Überhitzungsgefahr, als die einfache Anzahl der Übertemperaturstunden.

3.5.3. Überschreitungshäufigkeit der Komfortklassen nach EN 15251

Mit der EN 15251 (27) steht eine Systematik zur Verfügung, mit der unter anderem der thermische Komfort von Räumen und Gebäuden bewertet werden kann. Es werden hierfür 4 Kategorien definiert, die einer Klassifizierung von Gebäuden dienen. Folgende Tabelle zeigt die Beschreibung der Kategorien. Für die Bewertung wird die Klasse II als Anforderungswert festgelegt, was sich auch mit Überlegungen aus (28) deckt.

Tabelle 3.1: Beschreibung der Anwendbarkeit der verwendeten Kategorien nach DIN EN 15251:2012-12

Kategorie	Beschreibung
I	hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen.
II	normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude.
III	annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden.
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden.

Zur Bewertung des thermischen Komforts steht das adaptive Komfortmodell zur Verfügung. Da das adaptive Komfortmodell für nicht aktiv gekühlte Gebäude zulässig ist, kann daraus ein Komfortanspruch für neue Gebäude abgeleitet werden. Bei diesem Modell ist der Grenzwert der operativen Innentemperatur abhängig vom gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur. Bei höheren Außentemperaturen werden demnach entsprechend höhere Raumtemperaturen toleriert, wenn die Tage davor bereits wärmer waren. Somit wird zum Teil die Erwartungshaltung der Nutzer einbezogen.

In Abbildung 3.8 wird der normative Verlauf der Temperaturgrenzen der Komfortklassen I-III dargestellt. Im adaptiven Komfortmodell sind die Grenzwerte nur für Temperaturen von über 10°C (obere Grenze) bzw. über 15°C (untere Grenze) definiert. Darunter sind die Grenzen von gekühlten Gebäuden anzusetzen. Dies führt allerdings zu einer sprunghaften Änderung der Anforderung bei diesen Grenzen, die fachlich und physiologisch nur schwer erklärbar und interpretierbar sind und sich lediglich auf einer nicht vorhandenen Datengrundlage für Temperaturen unterhalb dieses Bereiches ergeben. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung im Rahmen dieser Studie auf der Grundlage des in Abbildung 3.9 dargestellten geglätteten Verlaufs (gleitende Komfortgrenze).

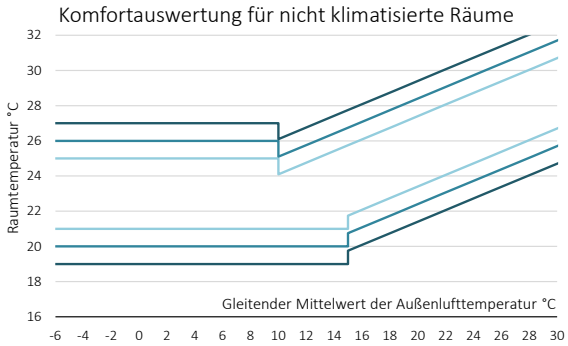


Abbildung 3.8: Normative Komfortgrenzen gemäß DIN EN 15251.

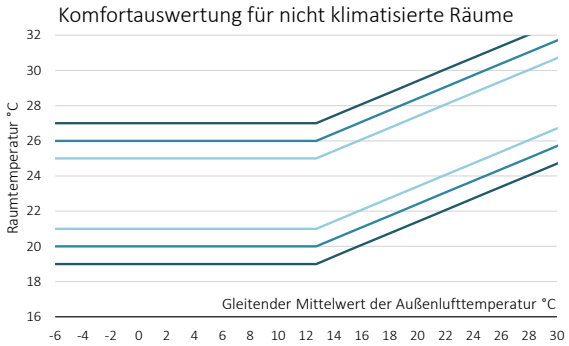


Abbildung 3.9: Gleitende Komfortgrenzen gemäß SimRoom in Anlehnung an DIN EN 15251.

Die empfohlenen Kriterien für zulässige Abweichungen von den Komfortgrenzen werden in EN 15251 im Anhang G informativ mit 3 % oder 5 % angegeben (27). Für die Festlegung von Mindestanforderungen wird die 5 %-Überschreitung als Kenngröße herangezogen.

3.6. Vergleich der Ergebnisse zum Berechnungsverfahren

In den folgenden Graphiken werden die Simulationsergebnisse von *IDA ICE* und *SimRoom* für eine Auswahl betrachteter Varianten bzgl. folgender Größen gegenübergestellt. Grundlage zur Festlegung der Nutzungszeiträume sind die Randbedingungen aus dem Vorentwurf des Reglements für Luxemburg (PRGD) mit für Nichtwohngebäude 12 h/d an 261 d/a (4).

- WG | NWG Übertemperaturgradstunden > 26°C | Jahr (8.760 h/a) in Kh/a
- NWG Übertemperaturgradstunden > 26°C | Nutzzeit (3.132 h/a) in Kh/a
- WG | NWG Anteil der Übertemperaturstunden > 26°C | Jahr (8.760 h/a) in %
- NWG Anteil der Übertemperaturstunden > 26°C | Nutzzeit (3.132 h/a) in %
- WG | NWG Maximale operative Temperatur | Jahr (8.760 h/a) in °C
- WG | NWG Mittlere operative Temperatur | Jahr (8.760 h/a) in °C

Die Ergebnisse zeigen, dass eine gute Übereinstimmung bei den Berechnungsergebnissen vorliegt.

- Bezogen auf die **maximale Jahresraumtemperaur**, liegen die Abweichungen zwischen minimal -0,02°C und maximal 1,4°C und im Durchschnitt über alle Varianten bei 0,67°C.

- Bezogen auf die **mittlere Jahresraumtemperatur** liegen die Abweichungen zwischen minimal -0,27°C und maximal 0,21°C und im Durchschnitt über alle Varianten bei - 0,09°C.

- Bezogen auf die **Häufigkeit auftretender Raumtemperaturen** über 26°C, liegen die Unterschiede zwischen minimal -5,3% und maximal 9,0% und im Durchschnitt über alle Varianten bei -0,7%.

Die Tendenzen, die sich zum Beispiel durch den Einfluss des Sonnenschutzes, des Glasanteils und der Möglichkeit einer Fensternachtlüftung ergeben, können mit beiden Rechenansätzen ähnlich ausgeprägt abgebildet werden.

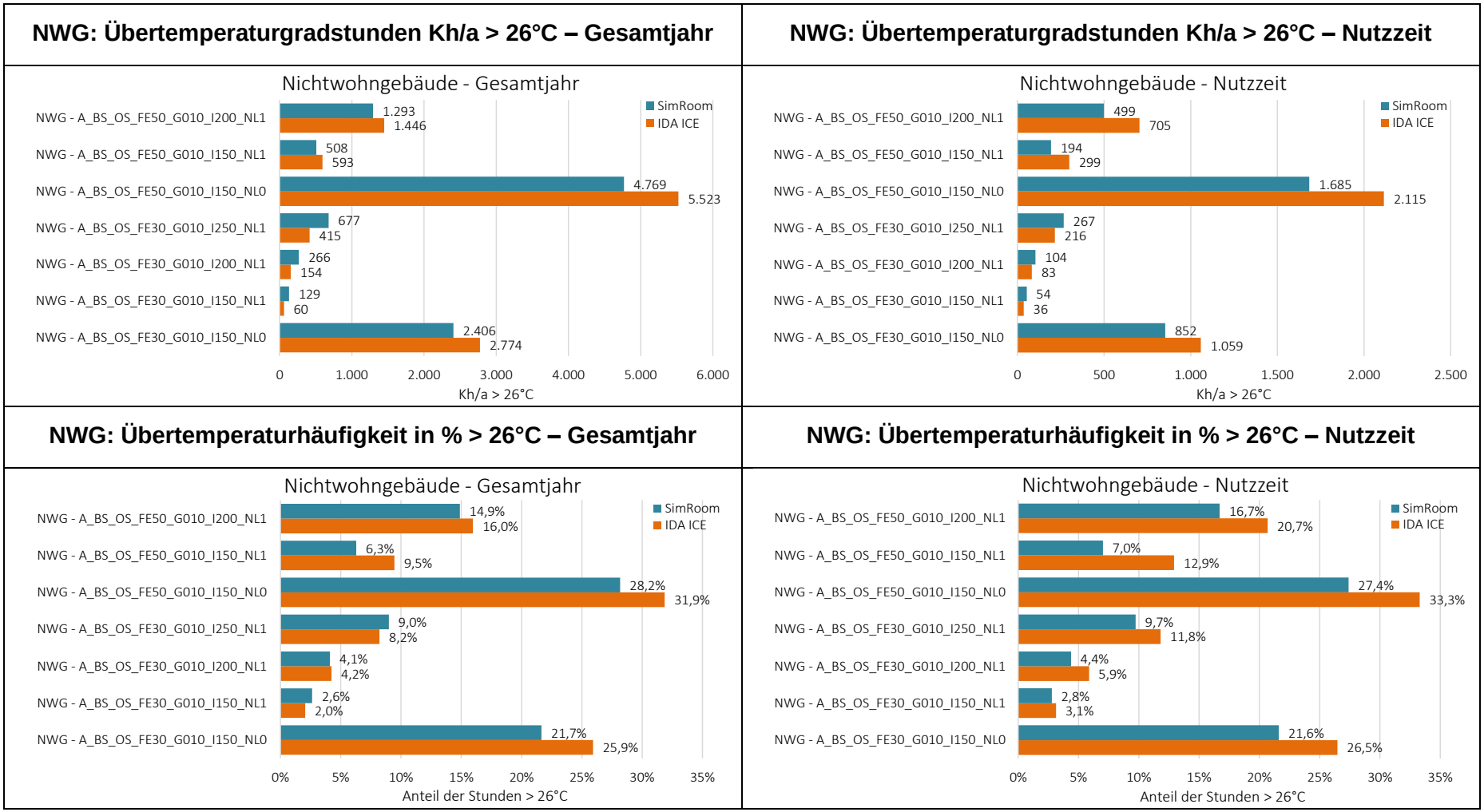


Abbildung 3.10: Vergleich der Übertemperaturgradstunden und der Übertemperaturhäufigkeit während der Nutzzeit und dem Gesamtjahr – mit SimRoom und IDA ICE für Nichtwohngebäude.

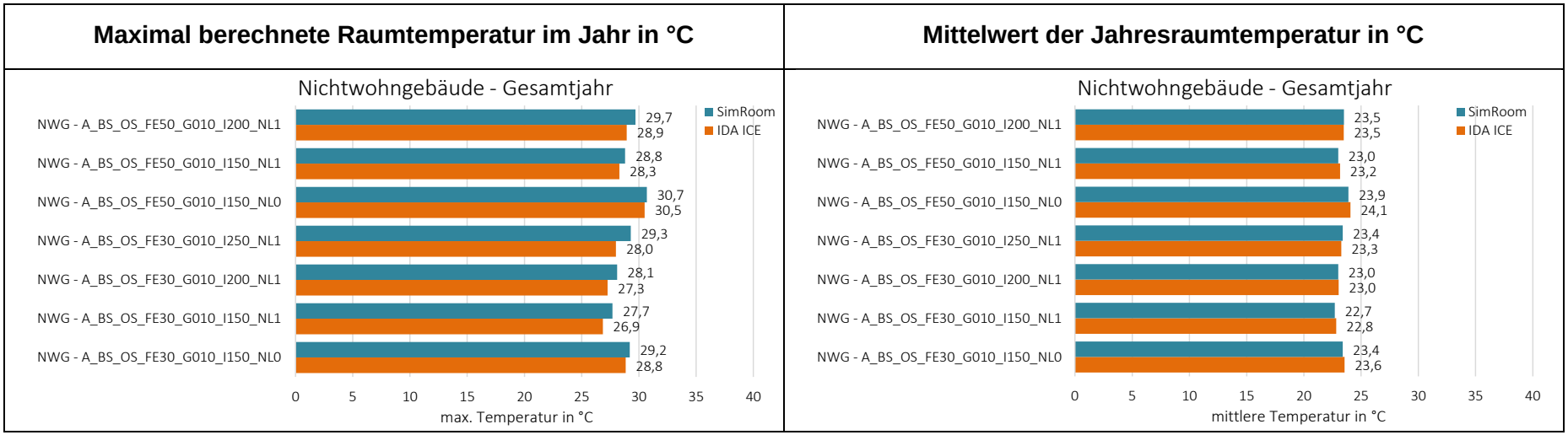


Abbildung 3.11: Vergleich der maximalen und mittleren im Jahr berechneten Raumtemperaturen – mit SimRoom und IDA ICE für Nichtwohngebäude.

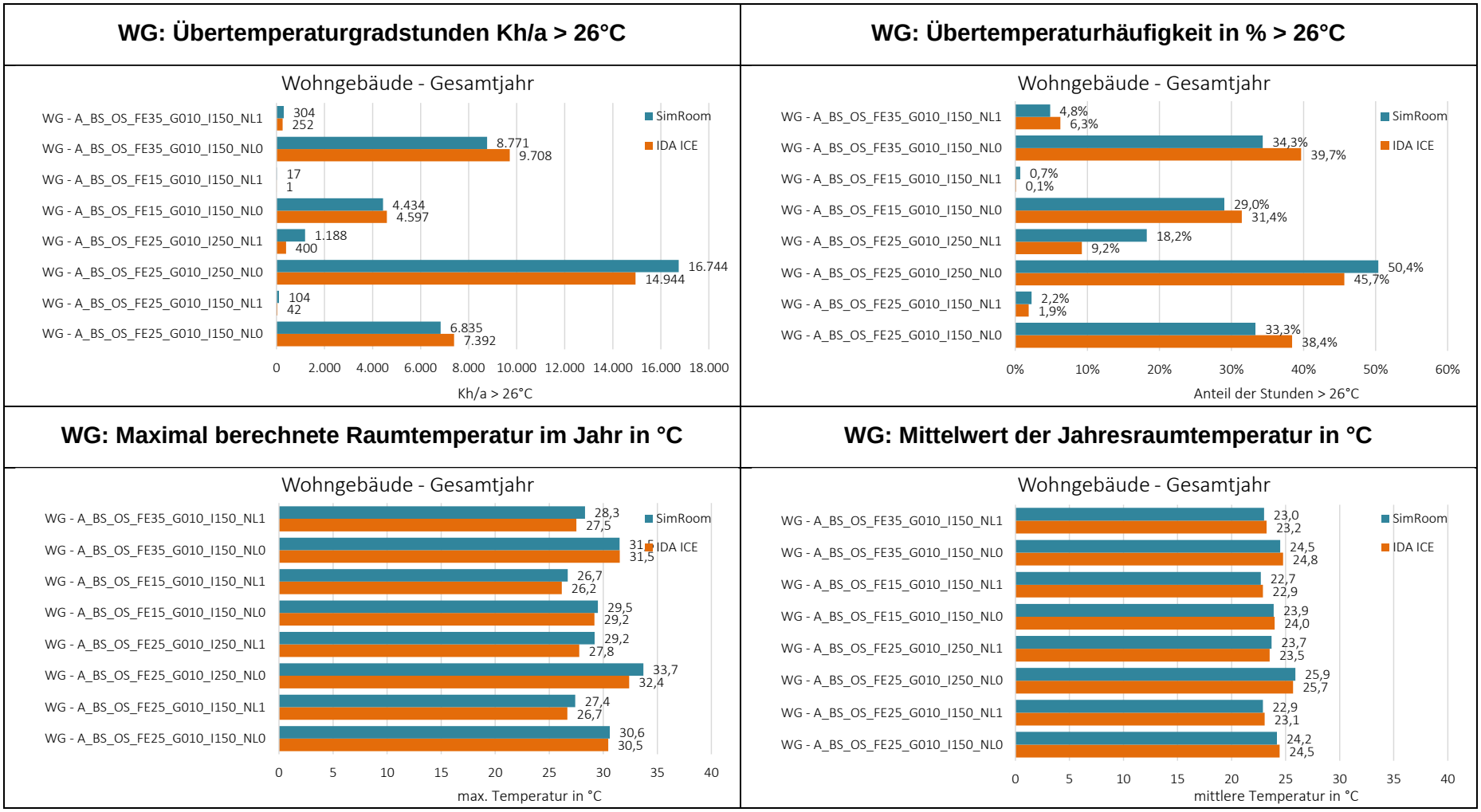


Abbildung 3.12: Vergleich der Übertemperaturgradstunden und der Übertemperaturhäufigkeit, sowie der maximalen und mittleren im Jahr berechneten Raumtemperaturen – mit SimRoom und IDA ICE für Wohngebäude.

4. Anforderungswerte für das Nachweisverfahren

Im derzeit gültigen RGD und im PRGD werden im Fall eines Nachweises des sommerlichen Wärmeschutzes mittels einer dynamisch-thermischen Simulation Anforderungen an die Überschreitungshäufigkeit gestellt. Wenn an nicht mehr als 10 % der Nutzungsstunden die Raumtemperatur über 26 °C liegt, gilt der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz als erfüllt (1), (4). Wie in Kapitel 3.5 angemerkt, ist die Bewertung der Überschreitungshäufigkeit als Kriterium nicht so aussagekräftig, wie die Übertemperaturgradstunden oder die Bewertung des Komforts nach dem adaptiven Komfortmodell. Folgend soll ein adäquater Anforderungswert abgeleitet werden.

4.1. Einfluss der Nutzungszeiten und des Bezugszeitraums

Beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2:2013-02, bei Verwendung einer dynamisch-thermischen Gebäudesimulation, ist die Anwesenheitszeit (Nutzzeit) als Bezugszeit für den zu bestimmenden Übertemperaturgradstundenwert zugrunde zu legen. Bei Wohngebäuden entspricht die Bezugszeit dem gesamten Jahr, also 8.760 h/a (Annahme: Wohnnutzung 24 h/d an 365 d/a). Bei Nichtwohngebäuden ist die Nutzzeit und somit die Bezugszeit von Montag bis Freitag 7:00 bis 18:00 Uhr definiert, also 261 d/a · 11 h/d = 2.871 h/a. Auch beim bestehenden Nachweisverfahren des sommerlichen Sommerschutzes für Luxemburg über eine thermische Gebäudesimulation (1) ist die Anzahl an Übertemperaturstunden nur auf die Nutzzeit des Gebäudes zu beziehen. Die neu im PRGD angesetzten Nutzungszeiten unterscheiden sich dadurch, dass die Stunde von 18:00 Uhr bis 19:00 Uhr mit in die Nutzung angegeben wird. Es ergeben sich dadurch 261 d/a · 12 h/d = 3.132 h/a Nutzungsstunden (4). Abweichend zur aktuellen Version des PRGD schlagen wir vor, die Nutzungszeitfenster für Nichtwohngebäude an die Vorgaben der DIN 4108-2:2013-02 und an die üblichen Nutzungszeiträume der DIN V 18599-10:2018-09 (29) mit 11 Stunden pro Tag (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr) anzupassen, damit die Ergebnisse besser vergleichbar sind und auch um eine gewisse Konsistenz bei der Festlegung der Zeitfenster auch mit dem Energiepass herzustellen. Alle folgenden Analysen beziehen sich daher auf den angepassten Nutzungszeitraum von 11 h/d für Nichtwohngebäude.

Gemäß DIN 4108-2:2013-02 sind für Nichtwohngebäude in einem mittelwarmen Klima 500 Kh/a und für Wohngebäude 1.200 Kh/a als Anforderungswert angegeben. Da dieser Wert zum einen vom vorhandenen Klimadatensatz und zum anderen von der Nutzungszeit abhängen, sind die Anforderungswerte zu überprüfen und ggf. anzupassen. Abbildung 4.1 zeigt für eine Auswahl an NWG-Varianten die Anzahl der Übertemperaturgradstunden während der Nutzzeit in Abhängigkeit der Übertemperaturgradstunden über das Gesamtjahr. Die Regression ergibt einen linearen Verlauf mit einer Steigung von 0,332. Die Steigung von 0,332 entspricht in etwa auch dem Verhältnis zwischen der Nutzzeit und der Gesamtzahl der Stunden im Jahr (261 d/a · 11 h/d / 8.760 h/a = 0,327).

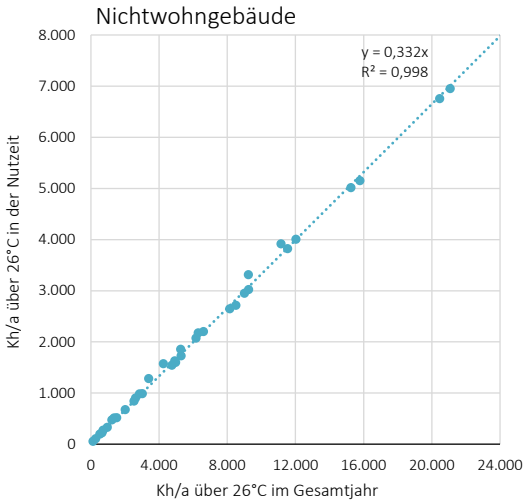


Abbildung 4.1: Übertemperaturgradstunden während der Nutzzeit in Abhängigkeit der Übertemperaturgradstunden über das Gesamtjahr.

Möchte man den Anforderungswert auf eine variable Nutzungszeit beziehen, so kann dies vereinfacht über folgenden Ansatz erfolgen.

$$Anforderungswert_{variabel} = \frac{t_{variabel}}{t_{Nutzzeit}} \cdot Anforderungswert_{Nutzzeit} = \frac{t_{variabel}\left[{}^{h}/_{a}\right]}{261\left[{}^{d}/_{a}\right] \cdot 11\left[{}^{h}/_{d}\right]} \cdot 500\left[{}^{Kh}/_{a}\right]$$

Zu modifizierende Tabellen im PRGD

Folgend die aktualisierten Tabellen mit den standardisierten Randbedingungen für die Jahressimulation je für Wohn- und Nichtwohngebäude, damit sie mit dem Ansatz der homogenisierten Betriebszeiten kompatibel sind.

Tabelle 4.1: facteur du profil standard pour un bâtiment d'habitation (WD = jour d'exploitation; WE = week-end)

	exploitation du bâtiment f_u		**charge interne (appareils) f_i**		**occupation par personnes f_p**		**ventilation f_l**		**ventilation nocturne f_{nl}**	
h	WD	WE	WD	WE	WD	WE	WD	WE	WD	WE
0-1	1,00	1,00	0,22	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1-2	1,00	1,00	0,19	0,22	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2-3	1,00	1,00	0,18	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3-4	1,00	1,00	0,18	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4-5	1,00	1,00	0,20	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5-6	1,00	1,00	0,32	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6-7	1,00	1,00	0,47	0,24	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
7-8	1,00	1,00	0,56	0,36	0,85	0,85	1,00	1,00	0,00	0,00
8-9	1,00	1,00	0,57	0,55	0,75	0,75	1,00	1,00	0,00	0,00
9-10	1,00	1,00	0,54	0,69	0,65	0,65	1,00	1,00	0,00	0,00
10-11	1,00	1,00	0,53	0,80	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00
11-12	1,00	1,00	0,58	0,85	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00
12-13	1,00	1,00	0,59	0,77	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00
13-14	1,00	1,00	0,53	0,63	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00
14-15	1,00	1,00	0,48	0,53	0,65	0,65	1,00	1,00	0,00	0,00
15-16	1,00	1,00	0,45	0,46	0,65	0,65	1,00	1,00	0,00	0,00
16-17	1,00	1,00	0,47	0,45	0,65	0,65	1,00	1,00	0,00	0,00
17-18	1,00	1,00	0,57	0,54	0,85	0,85	1,00	1,00	0,00	0,00
18-19	1,00	1,00	0,69	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
19-20	1,00	1,00	0,72	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
20-21	1,00	1,00	0,67	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
21-22	1,00	1,00	0,58	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
22-23	1,00	1,00	0,46	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
23-24	1,00	1,00	0,32	0,31	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 4.2: facteur du profil standard pour un bâtiment fonctionnel (WD = jour d'exploitation; WE = week-end)

	exploitation du bâtiment f_u		**charge interne (appareils) f_i**		**occupation par personnes f_p**		**ventilation f_l**		**ventilation nocturne f_{nl}**	
h	WD	WE	WD	WE	WD	WE	WD	WE	WD	WE
0-1	0,00	0,00	0,25	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
1-2	0,00	0,00	0,23	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
2-3	0,00	0,00	0,22	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
3-4	0,00	0,00	0,25	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
4-5	0,00	0,00	0,29	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
5-6	0,00	0,00	0,31	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
6-7	0,00	0,00	0,40	0,21	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
7-8	1,00	0,00	0,63	0,22	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
8-9	1,00	0,00	0,83	0,24	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
9-10	1,00	0,00	0,90	0,27	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
10-11	1,00	0,00	0,92	0,30	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
11-12	1,00	0,00	0,89	0,32	0,75	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
12-13	1,00	0,00	0,79	0,33	0,50	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
13-14	1,00	0,00	0,72	0,32	0,75	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
14-15	1,00	0,00	0,73	0,29	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
15-16	1,00	0,00	0,77	0,26	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
16-17	1,00	0,00	0,77	0,28	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
17-18	1,00	0,00	0,68	0,33	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
18-19	0,00	0,00	0,51	0,36	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,41	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-21	0,00	0,00	0,37	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21-22	0,00	0,00	0,34	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22-23	0,00	0,00	0,32	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
23-24	0,00	0,00	0,29	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00

4.2. Randbedingungen zur Lüftung

Wie die vorigen Ergebnisse zeigen, ist der Luftwechsel – insbesondere während der Nacht – maßgeblich für das Abführen von im Gebäude eingespeicherten Wärme und zur Erreichung von komfortableren Temperaturbedingungen. In folgenden Tabellen sind die Berechnungsrandbedingungen für Gebäudesimulationen (WG und NWG) gemäß DIN 4108-2:2013-02 und für das neue Verfahren Luxemburg aus dem PRGD gegenübergestellt.

Tabelle 4.3: Vergleich des ansetzbaren Luftwechsels für Wohngebäude – DIN 4108-2 | Verfahren Luxemburg

	DIN 4108-2:2013-02	**PRGD LU**
Grundluftwechsel	n = 0,5 [h^{-1}]	n = 0,3 [h^{-1}] dies entspricht üblichen Luftwechseln von Gebäuden der Klasse A mit Lüftungsanlage und WRG (für WG seit 2017 in LU gesetzliche Grundlage)
Erhöhter Tagluftwechsel	6 bis 23 Uhr bei $T_{i,Luft}$ > 23 °C: n = 3,0 [h^{-1}]	6 bis 22 Uhr bei $T_{i,Luft}$ > 26 °C und $T_{Außen}$ > 16 °C und ΔT > 4 K[2] Fensterlüftung: Berechnung des LWs gemäß der verfügbaren geometrischen Fensteröffnung und möglichst realistischen Randbedingungen.
Erhöhter Nachtluftwechsel	23 bis 6 Uhr bei $T_{i,Luft}$ > 20 °C n = 2,0 [h^{-1}] bei möglicher Fensterlüftung n = 5,0 [h^{-1}] bei geschossübergreifender Fensterlüftung LW gemäß Anlagendimensionierung bei Nachtlüftung über RLT-Anlage	22 bis 6 Uhr bei $T_{i,Luft}$ > 24 °C und $T_{Außen}$ > 12 °C und ΔT > 2 K(2) Fensterlüftung: Berechnung des LWs gemäß der verfügbaren geometrischen Fensteröffnung und möglichst realistischen Randbedingungen. Erhöhter LW über RLT-Anlage in der Praxis insbesondere bei WG nur bedingt möglich.

[2] Das PRGD schreibt die Grenztemperaturen für die Aktivierung einer Tag- und/oder Nachtlüftung nicht vor. Die für die Simulation angesetzten Grenzwerte müssen jedoch im Rahmen des Nachweises zum sommerlichen Wärmeschutz dokumentiert werden. Die in der Tabelle aufgeführten Grenzwerte für die Nachtlüftung ($T_{i,Luft}$ > 24°C und $T_{Außen}$ > 12°C und ΔT > 2K) und die Taglüftung ($T_{i,Luft}$ > 26°C und $T_{Außen}$ > 16°C und ΔT > 4K) gelten als Standardwerte, die auch in der Praxis angewandt werden können.

Tabelle 4.4: Vergleich des ansetzbaren Luftwechsels für Nichtwohngebäude - DIN 4108-2 | Verfahren Luxemburg

	DIN 4108-2:2013-02	**PRGD LU**
Grundluftwechsel	Nutzzeit Mo. bis Fr. von 7 bis 18 Uhr $n = 4 \cdot A_g / V_n$ [h^{-1}] Außerhalb der Nutzzeit $n = 0{,}24$ [h^{-1}]	Nutzzeit Mo. bis Fr. von 6 bis 20 Uhr Laufzeit der Lüftung +1 h vor und nach der Betriebszeit $n = 4 \cdot A_g / V_n$ [h^{-1}] Ansonsten $n = 0{,}72 \cdot A_g/V_n$ [h^{-1}]
Erhöhter Tagluftwechsel	7 bis 18 Uhr bei $T_{i,Luft} > 23$ °C $n = 3{,}0$ [h^{-1}]	6 bis 22 Uhr bei $T_{i,Luft} > 26$ °C und $T_{Außen} > 16$ °C und $\Delta T > 4$ K[2] Fensterlüftung: Berechnung des LWs gemäß der verfügbaren geometrischen Fensteröffnung und möglichst realistischen Randbedingungen.
Erhöhter Nachtluftwechsel	18 bis 7 Uhr bei $T_{i,Luft} > 21$°C $n = 2{,}0$ [h^{-1}] bei möglicher Fensterlüftung $n = 5{,}0$ [h^{-1}] bei geschossübergreifender Fensterlüftung LW gemäß Anlagendimensionierung bei Nachtlüftung über RLT-Anlage	22 bis 6 Uhr bei $T_{i,Luft} > 24$ °C und $T_{Außen} > 12$ °C und $\Delta T > 2$ K[2] Fensterlüftung: Berechnung des LWs gemäß der verfügbaren geometrischen Fensteröffnung und möglichst realistischen Randbedingungen. LW gemäß Anlagendimensionierung bei Nachtlüftung über RLT-Anlage (z.B. n=1,33 [h^{-1}])

4.2.1. Einfluss der Berücksichtigung einer Wärmerückgewinnung

Hervorzuheben ist, dass die angegebenen Grundluftwechsel beim Nachweis gemäß DIN 4108-2:2013-02 ohne Berücksichtigung einer Wärmerückgewinnung angesetzt werden. Dies entspricht jedoch oft nicht der realen Betriebsweise von mechanisch belüfteten Gebäuden, wie sie für alle neuen Wohn- und Nichtwohngebäude in Luxemburg vorgesehen sind. Aus diesem Grund wird beim Nachweisverfahren Luxemburg die Wärmerückgewinnung der RLT-Anlage mitberücksichtigt. Bei Erfüllung festgelegter Kriterien kann die Wärmerückgewinnung über den Bypass der RLT-Anlage umgangen werden (z.B. falls Außenlufttemperatur > 15°C und Außenlufttemperatur < Raumlufttemperatur). Diese Kriterien sind beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes zu dokumentieren und können später auch als Regelparameter dienen.

Die hygienische Lüftung erfolgt bei neuen Gebäuden in Luxemburg als Anforderung über eine RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung (2). Zusätzlich kann und sollte natürlich eine Fensterlüftung vorgesehen werden, um bspw. in den kühleren Nachtstunden überschüssige Wärme abführen zu können. Diese kann automatisch oder manuell erfolgen. Bei der mechanischen Lüftung ist

die mögliche Wärmeabfuhr beim Einsatz einer Wärmerückgewinnung eingeschränkt und sollte bei Erfüllung festgelegter Kriterien über einen Bypass-Betrieb umgangen werden. Nichtsdestotrotz hat die Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung von Lüftungsanlagen einen Einfluss auf die Simulationsergebnisse bei der thermischer Gebäudesimulation. Die durchgehende Berücksichtigung einer Wärmerückgewinnung führt demnach i.d.R. zu einem ausgeprägteren Überhitzungsverhalten, als dies bei Anwendung der Randbedingungen gemäß DIN 4108-2:2013-02 (Luftwechsel ohne WRG) der Fall ist.

Der Einfluss der Wärmerückgewinnung auf das Überhitzungsrisiko von Gebäuden zeigt in diesem Zusammenhang auch, dass bei der Planung von RLT-Anlagen eine Bypass-Funktion der Wärmerückgewinnung vorgesehen werden sollte, welche in Abhängigkeit der Außen- und/oder Raumtemperaturen gesteuert werden kann.

4.2.2. Ausprägung erhöhter Tag- und Nachtluftwechsel

Beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2:2013-02 unter Verwendung einer thermischen Simulation kann unter bestimmten Bedingungen ein erhöhter Tagluftwechsel und/oder Nachtluftwechsel angesetzt werden, um eine Überhitzung des Raumes zu vermeiden. Gemäß DIN 4108-2:2013-02 wird bei Erfüllung dieser Kriterien für die dynamisch-thermische Simulation ein erhöhter und konstanter Luftwechsel angesetzt. In der Realität stellt sich bei einer Fensterlüftung jedoch ein Luftwechsel ein, der wesentlich von der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft und zudem vom Windeinfluss abhängig ist (s. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Der über Fenster realisierbare Luftwechsel ist auch vom eingesetzten Fenstertyp abhängig (Kipp- Dreh, Schiebe, usw.) und hängt zudem von den geometrischen Bedingungen und der Einbausituation ab. Hinweise hierzu finden sich z.B. in (30), (31), (32).

In Abbildung 4.2 wird der ermittelte Jahres-Mittelwert des Fensterluftwechsels für verschiedene Varianten dargestellt, wobei nur Stunden mit aktiver Nachtlüftung berücksichtigt werden. Die Auswertung der Simulationsergebnisse bzgl. der Fensterlüftung zeigt, dass die in der DIN 4108-2:2013-02 angesetzten erhöhten Tag- und Nachtluftwechsel im Mittel, und unter der Annahme einer wirksamen Fensteröffnungsfläche von 1 % bezogen auf die Raumfläche, nicht immer erreicht werden – insbesondere dann, wenn sich die Außentemperatur nicht wesentlich von der Raumtemperatur unterscheidet (fehlender thermischer Antrieb). Die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis relativieren sich allerdings, da bei größeren Fensteröffnungen zwar der realisierbare Luftwechsel steigt, sich aber gleichzeitig auch die Aktivierungs- bzw. Betriebszeiten reduzieren. Bei geringen Luftwechseln müssen die Fenster entsprechend länger geöffnet sein, um die gleiche Wärmemenge abzuführen (s. Abschnitt 3.2).

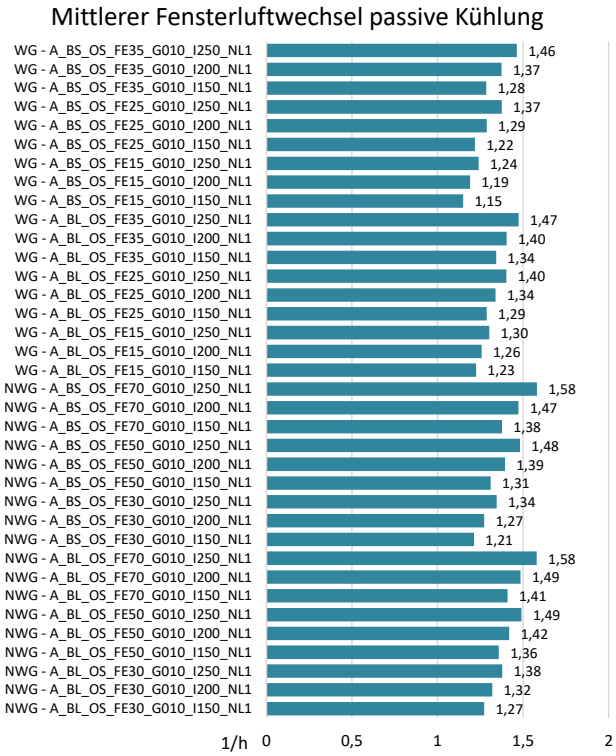


Abbildung 4.2: Mittlerer Fensterluftwechsel bei Nachtlüftung.

4.3. Auswertung und Ableitung Anforderungswert

Abbildung 4.3 zeigt für Nichtwohngebäude und Wohngebäude die Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Überschreitung der Komfortklasse II gemäß EN 15251 (adaptives Modell) für die verschiedenen Varianten. Die Korrelation dieser Werte verläuft nicht linear, da die Übertemperaturgradstunden in unkomfortablen Bereichen stärker ausgeprägt sind und im Modell auch Varianten (Extremfälle) untersucht worden sind, die hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes nicht baubar sind. Abbildung 4.4 zeigt für Nichtwohngebäude die Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Überschreitung der Komfortklasse II gemäß EN 15251 (adaptives Modell) für eine Auswahl an Varianten – jeweils für den Bezugszeitraum Nutzzeit und Gesamtjahr.

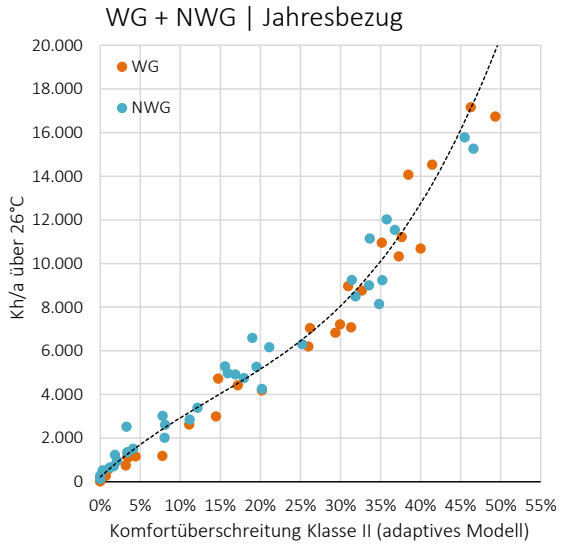


Abbildung 4.3: Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Überschreitung der Komfortklasse II gemäß EN 15251 (adaptives Modell) für eine Auswahl an Varianten (NWG und WG).

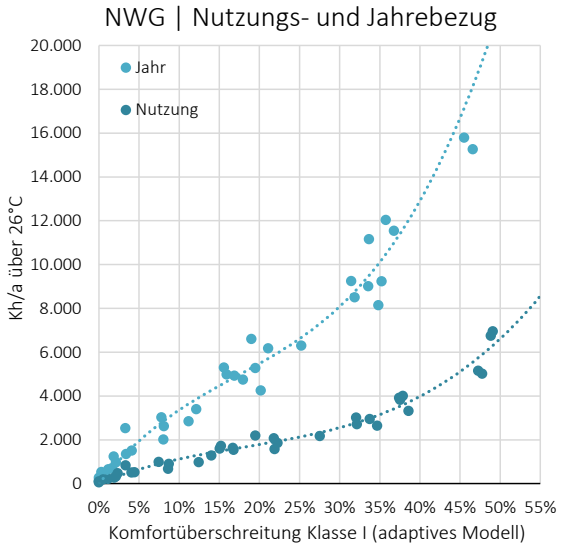


Abbildung 4.4: Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Überschreitung der Komfortklasse II gemäß EN 15251 (adaptives Modell) für eine Auswahl an Varianten jeweils für die Bezugszeiträume „Nutzzeit“ und „Gesamtjahr“ (NWG).

Legt man die Komfortklasse II nach EN 15251 und eine Überschreitungshäufigkeit von weniger als 5% als Mindestanforderung fest, können entsprechend den Trendfunktionen Werte für Übertemperaturgradstunden abgeleitet werden. Für Wohn- und Nichtwohngebäude kann ein Anforderungswert von gerundet **1.650 Kh/a** für das Gesamtjahr und gerundet **660 Kh/a** bezogen auf die Nutzzeit bei Nichtwohngebäuden bestimmt werden, bei dem das Komfortkriterium beim adaptiven Komfortmodell ebenfalls eingehalten wird.

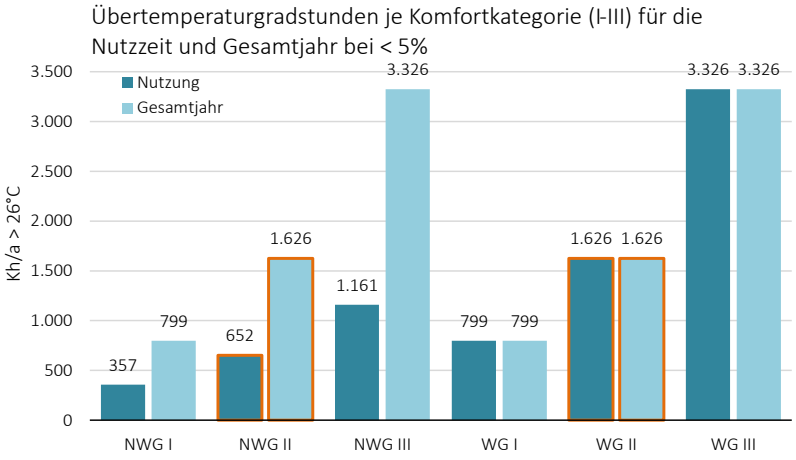


Abbildung 4.5: Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit der Komfortklasse I bis III gemäß EN 15251 (adaptives Modell) für Wohn- und Nichtwohngebäude und bei Nichtwohngebäuden für die Zeiträume Nutzzeit und Gesamtjahr.

4.4. Anwendbarkeit des vereinfachten Verfahrens

Neue Gebäude weisen aufgrund ihrer Dämmung nur verhältnismäßig geringe Transmissionswärmeverluste auf und aufgrund ihrer luftdichten Bauweise auch nur geringe ungewollte Lüftungswärmeverluste über Infiltration. In den Sommermonaten kann ein Wärmeüberschuss durch interne Lasten und solare Gewinne nur über die Lüftung effizient abgeführt werden. Das zeigt sich auch bei der Auswertung der Simulationsrechnungen.

Alle Testfälle wurden auch mit dem Verfahren der solaren Durchlässigkeit t_S bewertet und es zeigt sich, dass die Anforderungen hier in der Regel immer erfüllt werden (außer beim über Eck verglasten Raum in leichter Bauweise). Basierend auf den Simulationsrechnungen werden die Komfortbedingungen (Übertemperaturgradstunden | Übertemperaturhäufigkeit | Überschreitungshäufigkeit einer Komfortkategorie II) meist nur im Fall von über Fenster gelüfteten Varianten erreicht. Das einfache Verfahren führt also in dieser Form zu geringen Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz. Unterschiede in der Bewertung ergeben sich auch durch den verwendeten Klimadatensatz, der im Fall der Simulation festgelegt wird. Möchte man das vereinfachte Verfahren beibehalten, empfiehlt sich dessen Anwendbarkeit zu erweitern. Konkret bedeutet das, dass die Nutzung des einfachen Verfahrens an die Möglichkeit einer grundsätzlichen Fensterlüftung oder einer möglichen Nachtkühlung über die RLT-Anlage gekoppelt sein sollte.

Tabelle 4.5: Vergleich der Anforderungen einfaches Verfahren t_S mit Ergebnissen aus Übertemperaturgradzahl, Übertemperaturhäufigkeit und Überschreitungshäufigkeit einer Kategorie II für Wohn- und Nichtwohngebäude.

Typ	FE	BS	Iss	NL	Kh/a	>26	>II	$t_{s,max}$	t_s	Typ	FE	BS	Iss	NL	Kh/a	>26	>II	$t_{s,max}$	t_s
NWG 1	FE30	BL	I150	NL0	989	19%	7%	5,7%	3,0%	WG 1	FE15	BL	I150	NL0	4.733	28%	15%	5,7%	1,5%
NWG 2	FE30	BL	I150	NL1	222	6%	1%	5,7%	3,0%	WG 2	FE15	BL	I150	NL1	247	3%	0%	5,7%	1,5%
NWG 3	FE30	BL	I200	NL0	1.602	28%	15%	5,7%	3,0%	WG 3	FE15	BL	I200	NL0	7.222	34%	30%	5,7%	1,5%
NWG 4	FE30	BL	I200	NL1	332	10%	2%	5,7%	3,0%	WG 4	FE15	BL	I200	NL1	358	4%	1%	5,7%	1,5%
NWG 5	FE30	BL	I250	NL0	2.718	39%	32%	5,7%	3,0%	WG 5	FE15	BL	I250	NL0	10.688	41%	40%	5,7%	1,5%
NWG 6	FE30	BL	I250	NL1	675	18%	9%	5,7%	3,0%	WG 6	FE15	BL	I250	NL1	757	9%	3%	5,7%	1,5%
NWG 7	FE50	BL	I150	NL0	1.729	25%	15%	5,7%	5,0%	WG 7	FE25	BL	I150	NL0	7.047	32%	26%	5,7%	2,5%
NWG 8	FE50	BL	I150	NL1	519	12%	4%	5,7%	5,0%	WG 8	FE25	BL	I150	NL1	588	6%	1%	5,7%	2,5%
NWG 9	FE50	BL	I200	NL0	3.023	37%	32%	5,7%	5,0%	WG 9	FE25	BL	I200	NL0	11.219	39%	38%	5,7%	2,5%
NWG 10	FE50	BL	I200	NL1	982	22%	12%	5,7%	5,0%	WG 10	FE25	BL	I200	NL1	1.169	13%	4%	5,7%	2,5%
NWG 11	FE50	BL	I250	NL0	5.154	49%	47%	5,7%	5,0%	WG 11	FE25	BL	I250	NL0	17.169	47%	46%	5,7%	2,5%
NWG 12	FE50	BL	I250	NL1	2.177	37%	28%	5,7%	5,0%	WG 12	FE25	BL	I250	NL1	3.004	25%	14%	5,7%	2,5%
NWG 13	FE70	BL	I150	NL0	2.201	28%	20%	5,7%	7,0%	WG 13	FE35	BL	I150	NL0	8.973	34%	31%	5,7%	3,5%
NWG 14	FE70	BL	I150	NL1	902	17%	9%	5,7%	7,0%	WG 14	FE35	BL	I150	NL1	1.187	11%	3%	5,7%	3,5%
NWG 15	FE70	BL	I200	NL0	4.007	41%	38%	5,7%	7,0%	WG 15	FE35	BL	I200	NL0	14.536	42%	41%	5,7%	3,5%
NWG 16	FE70	BL	I200	NL1	1.855	30%	22%	5,7%	7,0%	WG 16	FE35	BL	I200	NL1	2.624	21%	11%	5,7%	3,5%
NWG 17	FE70	BL	I250	NL0	6.954	50%	49%	5,7%	7,0%	WG 17	FE35	BL	I250	NL0	22.468	51%	50%	5,7%	3,5%
NWG 18	FE70	BL	I250	NL1	3.920	43%	37%	5,7%	7,0%	WG 18	FE35	BL	I250	NL1	6.202	35%	26%	5,7%	3,5%
NWG 19	FE30	BS	I150	NL0	842	22%	3%	8,6%	3,0%	WG 19	FE15	BS	I150	NL0	4.434	29%	17%	8,6%	1,5%
NWG 20	FE30	BS	I150	NL1	56	3%	0%	8,6%	3,0%	WG 20	FE15	BS	I150	NL1	17	1%	0%	8,6%	1,5%
NWG 21	FE30	BS	I200	NL0	1.547	30%	17%	8,6%	3,0%	WG 21	FE15	BS	I200	NL0	7.083	35%	31%	8,6%	1,5%
NWG 22	FE30	BS	I200	NL1	108	5%	0%	8,6%	3,0%	WG 22	FE15	BS	I200	NL1	42	1%	0%	8,6%	1,5%
NWG 23	FE30	BS	I250	NL0	2.647	39%	35%	8,6%	3,0%	WG 23	FE15	BS	I250	NL0	10.337	38%	37%	8,6%	1,5%
NWG 24	FE30	BS	I250	NL1	276	11%	2%	8,6%	3,0%	WG 24	FE15	BS	I250	NL1	130	2%	0%	8,6%	1,5%
NWG 25	FE50	BS	I150	NL0	1.630	28%	17%	8,6%	5,0%	WG 25	FE25	BS	I150	NL0	6.835	33%	29%	8,6%	2,5%
NWG 26	FE50	BS	I150	NL1	198	8%	1%	8,6%	5,0%	WG 26	FE25	BS	I150	NL1	104	2%	0%	8,6%	2,5%
NWG 27	FE50	BS	I200	NL0	2.950	36%	34%	8,6%	5,0%	WG 27	FE25	BS	I200	NL0	10.967	36%	35%	8,6%	2,5%
NWG 28	FE50	BS	I200	NL1	515	19%	4%	8,6%	5,0%	WG 28	FE25	BS	I200	NL1	277	5%	1%	8,6%	2,5%
NWG 29	FE50	BS	I250	NL0	5.017	49%	48%	8,6%	5,0%	WG 29	FE25	BS	I250	NL0	16.744	50%	49%	8,6%	2,5%
NWG 30	FE50	BS	I250	NL1	1.576	38%	22%	8,6%	5,0%	WG 30	FE25	BS	I250	NL1	1.188	18%	8%	8,6%	2,5%
NWG 31	FE70	BS	I150	NL0	2.073	29%	22%	8,6%	7,0%	WG 31	FE35	BS	I150	NL0	8.771	34%	33%	8,6%	3,5%
NWG 32	FE70	BS	I150	NL1	475	14%	2%	8,6%	7,0%	WG 32	FE35	BS	I150	NL1	304	5%	0%	8,6%	3,5%
NWG 33	FE70	BS	I200	NL0	3.824	39%	38%	8,6%	7,0%	WG 33	FE35	BS	I200	NL0	14.084	40%	38%	8,6%	3,5%
NWG 34	FE70	BS	I200	NL1	1.285	28%	14%	8,6%	7,0%	WG 34	FE35	BS	I200	NL1	1.097	15%	3%	8,6%	3,5%
NWG 35	FE70	BS	I250	NL0	6.756	49%	49%	8,6%	7,0%	WG 35	FE35	BS	I250	NL0	22.182	53%	53%	8,6%	3,5%
NWG 36	FE70	BS	I250	NL1	3.317	45%	39%	8,6%	7,0%	WG 36	FE35	BS	I250	NL1	4.197	36%	20%	8,6%	3,5%

Nach DIN 4108-2:2013-02 ist die Nachtlüftung wie folgt definiert: Das sommerliche Raumklima wird durch eine intensive Lüftung der Räume insbesondere während der Nacht- oder frühen Morgenstunden verbessert. Entsprechende Voraussetzungen (z.B. zu öffnende Fenster, geeignete Einrichtungen zur freien Lüftung) sollten daher vorgesehen werden. Eine Nachtlüftung kann auch mit einer raumlufttechnischen Anlage erfolgen. Es kann in der Regel von der Möglichkeit einer erhöhten Nachtlüftung ausgegangen werden, wenn in den Aufenthalts- oder Hauptnutzräumen öffenbare Fenster vorgesehen sind.

Eine Fensternachtlüftung lässt sich automatisieren. Das ist im Fall von Nichtwohngebäuden auch empfehlenswert, da die Aktivität in der Regel außerhalb der Anwesenheit von Personen erfolgt. Die Planung von öffenbaren Elementen sollte mindestens die folgenden Kriterien umfassen.

- Möglichst in jedem fassadennahen Raum auch öffenbare Fenster vorsehen
- Anordnung der Fenster oder Öffnungselemente
  (z.B. sind schmale und hohe Flügel sind vorteilhaft)
- Berücksichtigung einer guten Raum-/Gebäudedurchströmung (z.B. über Atrien)
- Sicherheitsaspekte (Einbruchschutz, schmale Fenster, Brandschutz, etc.)
- Insekten- und Nagerschutz (Druckverluste berücksichtigen, v.a. im EG)
- Bei Automatisierung: Regen-/Windschutz, Zeitprogramme und Temperaturregelung, sowie ggf. Sensoren bezüglich Einklemmschutz
- Versicherungstechnische Aspekte (s. (33))

5. Schlussfolgerungen

Die bisherigen Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz wurden mit dem RGD im Jahr 2010 eingeführt und gelten für Wohn- und Nichtwohngebäude (1), (2). Das damalige Ziel war, neben der Begrenzung des Kühlkältebedarfs von Gebäuden, eine Sensibilisierung diesbezüglich und auch ein möglichst einfaches Verfahren einzuführen, mit dem diese Anforderungen nachgewiesen werden können.

Im Zuge der Weiterentwicklung der energetischen Anforderungen wird auch der Kühlkältebedarf an Bedeutung zunehmen; bzw. in nicht klimatisierten Gebäuden der thermische Raumkomfort und das PRGD eröffnet hier die Nachweiserbringung über eine Simulationsrechnung. Die Anforderung ist in diesem Fall gemäß RGD und PRGD mit der Begrenzung der Übertemperaturhäufigkeit über einer Raumtemperatur von 26 °C an weniger als 10 % der Stunden in der Nutzzeit definiert. Dieses Kriterium ist nur bedingt aussagekräftig, da die Höhe der Temperaturüberschreitung nicht mit einbezogen wird. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte, in Anlehnung an die Anforderungen aus DIN 4108-2:2013-02, ein Anforderungswert für die Übertemperaturgradstunden von **660 Kh/a** für Nichtwohngebäude (nutzungszeitbezogen) und **1.650 Kh/a** für Wohngebäude (auf das Gesamtjahr bezogen) abgeleitet werden. Der Anforderungswert orientiert sich auch an den thermischen Komfortanforderungen nach EN 15251 der Klasse II. Dabei ist zu beachten, dass der Anforderungswert mit einem festgelegten Klimadatensatz bewertet wurde und dieser auch für die Nachweisführung zu verwenden ist. Im PRGD ist deshalb auch beschrieben, dass der Minister einen Datensatz diesbezüglich veröffentlicht. Alternativ kann der Nachweis auch erbracht werden, wenn nach EN 15251 die **Komfortklasse II** (mit gleitender Komfortgrenze) an weniger als **5 %** der Nutzungszeit **über**schritten wird. In beiden Fällen gelten die gleichen Randbedingungen. Dadurch eröffnet sich ein breiteres Spektrum zur Nutzung an am Markt verfügbaren Programmen.

Zwecks einer Harmonisierung mit dem Energiepass und mit dem normativen Umfeld, sollten der **Zeitbezug** und die **Berechnungsparameter** im PRGD auf die in Abschnitt 4.1 angegebenen

Randbedingungen angepasst werden. Das betrifft insbesondere die im PRGD angegebenen Nutzungszeiträume.

Darüber hinaus sollte in den Randbedingungen klar hervorgehen, dass die **mechanische Lüftung** von Gebäuden unter **Einbeziehung** einer **Wärmerückgewinnung** erfolgen muss. Diese kann jedoch in Abhängigkeit interner und externer Parameter im Bypass betrieben werden, wenn die technischen Voraussetzungen dafür erfüllt sind. Diese Funktion und Einstellungen sind nach PRGD auch zu dokumentieren.

Neben der geometrischen Öffnungsfläche, spielen auch der Typ (Kipp-, Klapp-, Dreh-, Schwing-, Wendefenster, etc.), die Anordnung, die Proportion, die Geometrie und die Einbausituation eine entscheidende Rolle für die Effektivität der Nachtlüftung. Die Randbedingungen sollten ebenfalls dokumentiert werden.

Im Fall der Anwendung des **vereinfachten Verfahrens** über die *solare Durchlässigkeit* t_S, sollte die Nutzung des Verfahrens an die **grundsätzliche Möglichkeit** einer **zusätzlichen Nacht-** oder **Taglüftungsmöglichkeit** gekoppelt sein. Andernfalls sollte das Verfahren nicht zur Anwendung kommen und der Nachweis ist über eine Simulationsrechnung mit den zuvor genannten Anforderungskriterien zu führen.

Mit dem PRGD sind neben der dynamisch-thermischen Simulation (in dem Fall muss die Software gemäß BESTEST validiert sein) explizit auch alternative Berechnungsverfahren angegeben (R5C1, EN 13790, EN 52016-1, VDI 6007-1, EN 13792, etc.). Für die mit dem R5C1-Modell untersuchten Fälle zeigen sich – zu Beantwortung der gegebenen Fragestellung – ausreichend gute Übereinstimmungen mit Ergebnissen aus dynamisch-thermischen Simulationsrechnungen. Der Aufwand für die Nachweisführung ist mit dem R5C1-Modell geringer und weniger fehleranfällig. Die Möglichkeit den Nachweis über eine berechnete Raumtemperaturentwicklung zu erstellen, führt auch zu griffigeren Aussagen, als ein kryptischer Anforderungswert zur solaren Durchlässigkeit t_S. Eine zu hoch berechnete Raumtemperatur von 32 °C ist deutlich eingängiger und intuitiver, als ein um 0,8 % überschrittener t_S-Wert.

Es hält sich immer noch hartnäckig das Gerücht, dass man in energieeffizienten Gebäuden oder in Passivhäusern keine Fenster öffnen kann. Das ist jedoch weder eine Vorgabe noch sinnvoll. Neben der dann persönlichen Einschränkung, hinsichtlich der Funktions- und Betriebsweise, zeigt sich, dass es sinnvoll und erforderlich ist, öffenbare Fenster im Gebäude vorzusehen. Dabei liegt der Fokus nicht auf dem Winterfall, denn hier sorgt die hygienische kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung für eine ausreichende Frischluftversorgung, sondern bei der Möglichkeit Wärmeüberschüsse und ggf. hohe Raumtemperaturen im Sommer/Übergangszeit abzuführen.

Wir beobachten in der letzten Dekade subjektiv eine tendenzielle Zunahme der Fensterflächenanteile im Wohnungsbau (z. B. vermehrt bodentiefe Fenster). Zur Begrenzung der solaren Gewinne und damit auch einer möglichen Überwärmung, ist ein sinnvoller Umgang mit transparenten Flächen angebracht. Werden große Fensterflächen realisiert, so muss auch ein sehr effizienter Sonnenschutz vorgesehen werden. Zudem muss der Sonnenschutz auch frühzeitig aktiviert werden, damit die solaren Gewinne im Raum begrenzt werden können. Das kann dazu führen, dass die Häufigkeit einer freien Aussicht in wärmeren Perioden stark abnimmt. Die Einplanung von Fenstern sollte sich, neben ästhetischen und praktischen Aspekten auch diesem Aspekt widmen und verantwortungsvoll erfolgen.

6. Literaturverzeichnis

1. **Le Gouvernement du grand-duché de Luxembourg.** Règlement grand-ducal du 31 août 2010 concernant la performance énergétique des bâtiments fonctionells et modifiant. Luxemburg : Service central de législation, 2010.

2. **Luxembourg, Le Gouvernement du grand-duché de.** Règlement grand-ducal du 23 juillet 2016 modifiant le règlement grand-ducal modifié du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation. Luxemburg : Service central de législation, 2016.

3. **DIN 4108-2:2013-02.** Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin : Beuth, 2013.

4. **Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire.** Projet de règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments modifiant le règlement grand-ducal modifié du 31 août 2010 concernant la performance énergétique des bâtiments fonctionnels. Luxemburg : s.n., 2020.

5. **Lichtmeß, Markus.** Ein Lernwerkzeug zur Überwärmung und Energiebilanz im dynamischen 1-Zonen-Raummodell. Ayl : www.enec.de, 2017.

6. **Norford, Leslie K.** Using simulation tools in a university laboratory course: assessing the performance of a health-care center in Lusaka, Zambia. Massachusets : Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 2006.

7. **Clemens, Joachim.** Entwicklung eines einfachen Modells zur Abschätzung der sommerlichen Überwärmung in Gebäuden. Siegen : Universität - Gesamthochschule Siegen, Fachbereich Physik, 2000.

8. **Burmeister, Harald und Keller, Bruno.** Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata: ein neuartiges Planungs- und Dimensionierungsinstrument. Teil 1: Grundlagen, Berechnungsbeispiele. Schweiz : Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 21, 1995.

9. **Keller, Bruno und Magyari, Eugen.** Energieeffiziente Bauten: Grundlagen für intelligente Planer energiesparsamer Bauten. Schweiz : Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 7, 2000.

10. **Burmeister, Harald und Keller, Bruno.** Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata: ein neuartiges Planungs- und Dimensionierungsinstrument. Teil II: Strategische Überlegungen. Schweiz : Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 23, 1995.

11. **Bödefeld, Sabine.** Die massgebenden Klimagrössen für den Energiebedarf eines Raumes. Schweiz : Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr.14010, 2001, 2001.

12. **Huber, Arthur, Müller, Christoph und Berchtold, Oliver.** Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern, Phase 1, Kosten - Nutzen - Analyse. Schweiz : Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 1996.

13. **Millet, Jean-Robert.** The simple hourly method of prEN 13790: a dynamic method for the future. France : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2007.

14. **Edmundas Monstvilas, Vytautas Stankevičius, Jūratė Karbauskaitė, Arūnas Burlingis & Karolis Banionis.** Hourly Calculation Method of Building Energy Demand for Space Heating and Cooling Based on Steady-State Heat Balance Equations. Journal of Civil Engineering and Management. 2012, S. 356-368.

15. **Nielsen, Toke Rammer und Svend Svendsen, Professor.** Simplified hourly calculation of energy performance in accordance with the Energy Performance of Buildings Directive. [Hrsg.] Department of Civil Engineering Technical University of Denmark. 2014 (Uploaddatum ResearchGate).

16. **Homics, Viktors und Kirkedal, Morten.** Evaluation of simlified models for checking compliance with building regulations - Prediction of thermal comfort in dwellings. Aalborg : Aalborg University, 2013.

17. **Horvat, Ivan und Dović, Damir.** DYNAMIC METHOD FOR CALCULATING ENERGY NEED IN HVAC SYSTEMS . s.l. : TRANSACTIONS OF FAMENA XL - Special issue 1 (2016), 2016. ISSN 1333-1124.

18. **Brunoa, Roberto, Pizzutia, Gianluca und Arcuria, Natale.** The prediction of thermal loads in building by means of the EN ISO 13790 dynamic model: a comparison with TRNSYS. Turin, Italy : Elsevier Ltd., 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2016, 14-16 , 2016. Energy Procedia 101 (2016) 192 – 199 .

19. **Nackler, Joachim Nathanael.** Sommerlicher Wärmeschutz - Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis. 2017 : Technischen Universität Wien, 2017.

20. **Gratzl-Michlmair, Markus.** Entwicklung und Adaption von Algorithmen zur Bewertung des Energiebedarfs von Lüftungsanlagen im Kontext des Energieausweises. s.l. : TU Graz, 2011.

21. **Michalak, Piotr.** The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland. Poland : AGH University of Science and Technology, Elsevier Ltd., Energy 75 (568-578), 2014.

22. **Bruno, R., Oliveti, G. und Arcuri, N.** n analytical model for the evaluation of the correction factor FW of solar gains through glazed surfaces defined in EN ISO 13790. Italy : DIMEG – Mechanical, Energetic and Management Engineering Department, University of Calabria; Elsevier B.V., 2015.

23. **Lichtmeß, Markus.** Vergleich TAS und SimRoom mit 2R1C und 5R1C . Ayl : www.enec.de, 2018.

24. **EN ISO 13790.** Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung. Brüssel : CEN, 2008.

25. **Knissel J., Dettner M., Lichtmeß M., Schöberlein F.** Reduzieren des Nutzkältebedarfs durch Fensternachtlüftung. Berlin : Bauphysik 31, Heft 3, 2019.

26. **Administration des bâtiment publics.** Komfort- und energieoptimierte Lycées, Planungsvorgaben für Architektur und Gebäudetechnik, Version 2.0. Luxemburg : Administration des bâtiment publics, 2014.

27. **DIN EN 15261:2012-12.** Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. Berlin : Beuth, 2012.

28. **Schlitzberger, Stephan.** Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls. Kassel : Universität Kassel, 2014.

29. **DIN V 18599-9:2016-10.** Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen. Berlin : Beuth, 2016.

30. **Bäumler, Armin.** Experimentelle Quantifizierung des thermisch induzierten Luftwechsels in Abhängigkeit von der Fensteröffnungsart sowie Beurteilung der Potenziale der Nachtlüftung. Kassel : Universität Kassel, 2016.

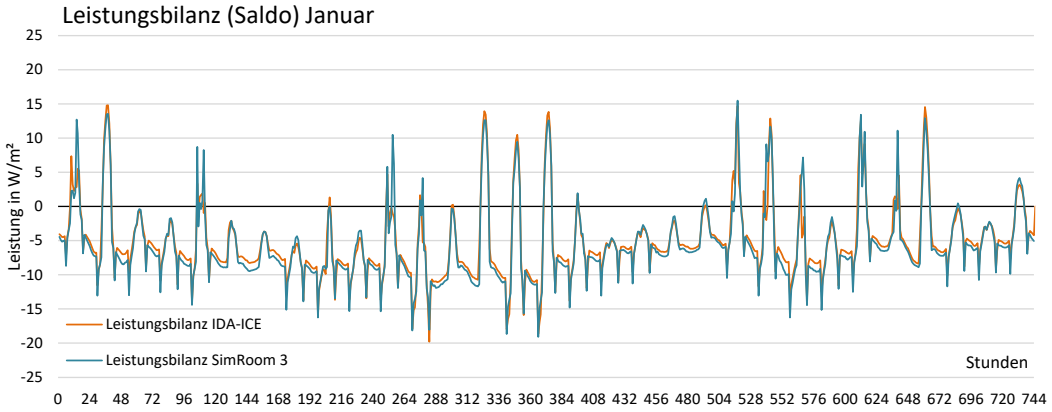
31. **Maas, Anton.** Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Kassel : Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.

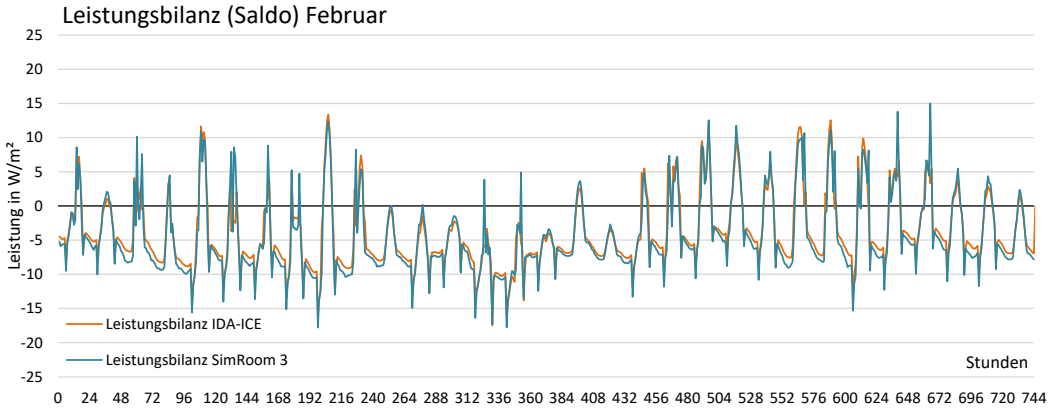
32. **W. Richter, J. Seifert, R. Gritzki, M. Rösler.** Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht - Kurzfassung. Dresden : Technische Universität Dresden, 2003.

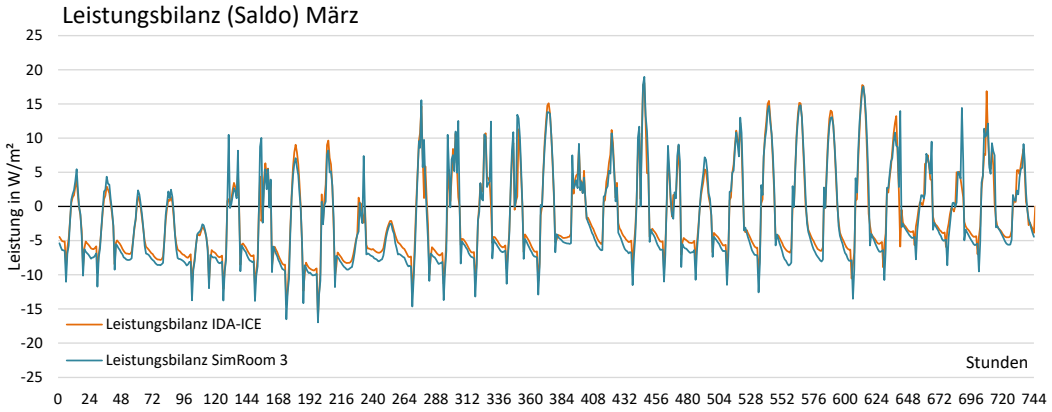
33. **Hörner M., Knissel J., Großklos M.** Versicherungsfragen bei Wärmeabfuhr durch sommerliche Nachtlüftung. Institut Wohnen und Umwelt (IWU) : Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 41 , 2010.

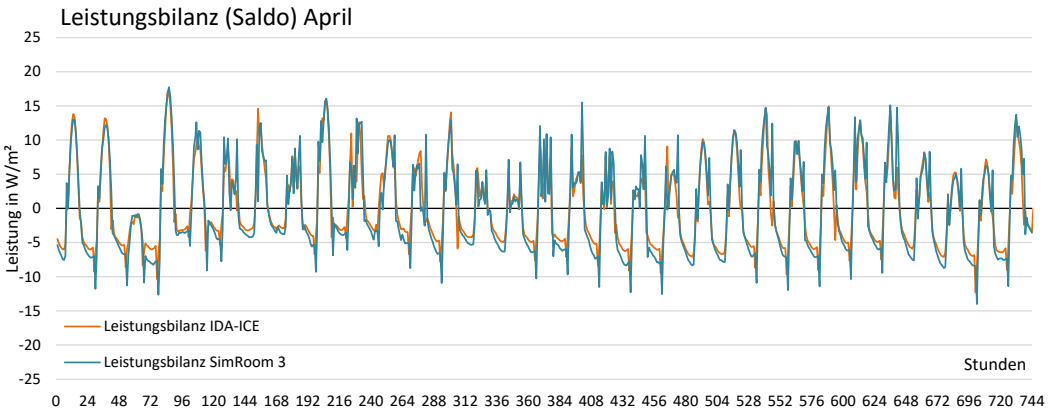
7. Anhang

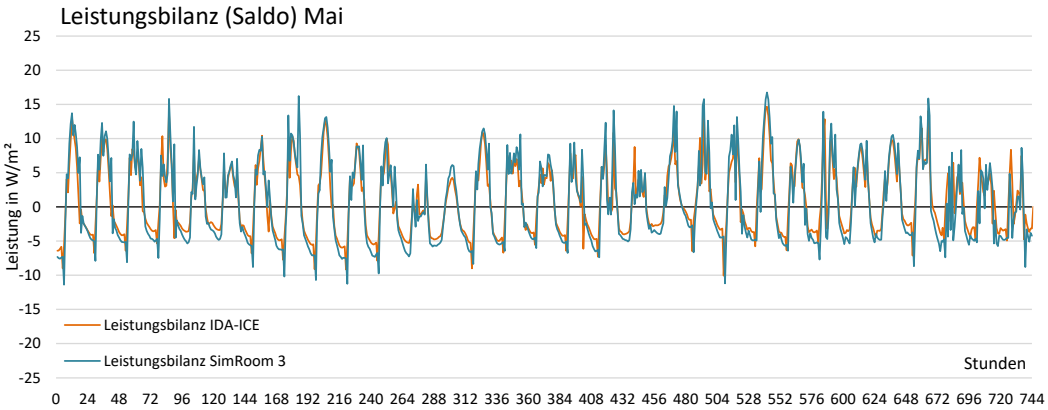
Folgende Bilder zeigen die Leistungen für Transmission, Lüftung, solare und interne Gewinne als Summenwert gemäß der Raumbilanzgleichung für eine Variante. Betrachtet man die Verläufe der einzelnen Monate, so kann eine ausreichend gute Übereinstimmung bei der Leistungsbilanzierung festgestellt werden.

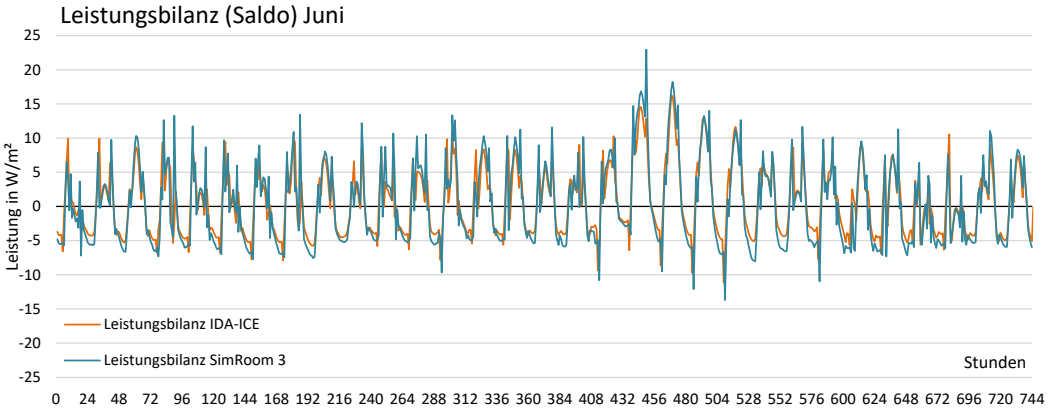


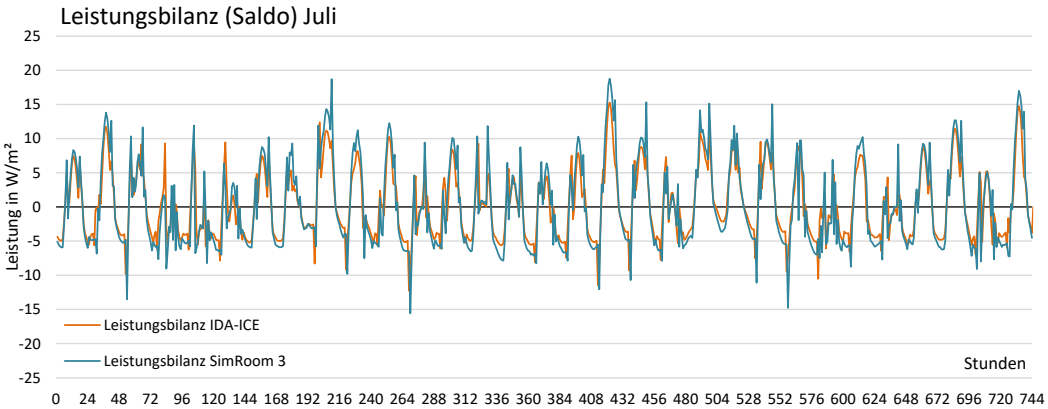


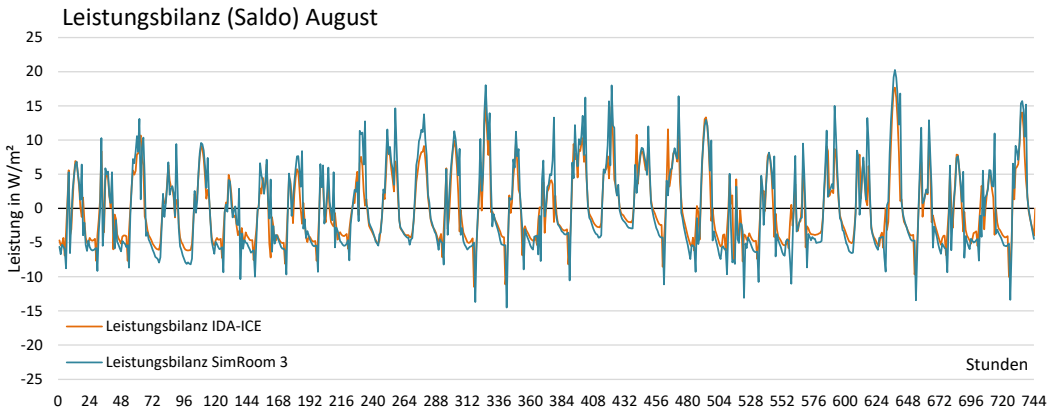


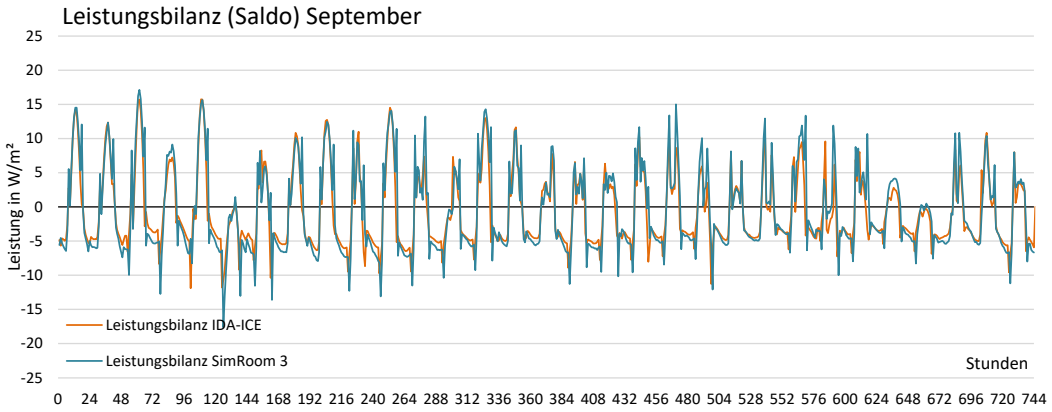

Leistungsbilanz (Saldo) April
Leistung in W/m²
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden
0 24 48 72 96 120 144 168 192 216 240 264 288 312 336 360 384 408 432 456 480 504 528 552 576 600 624 648 672 696 720 744

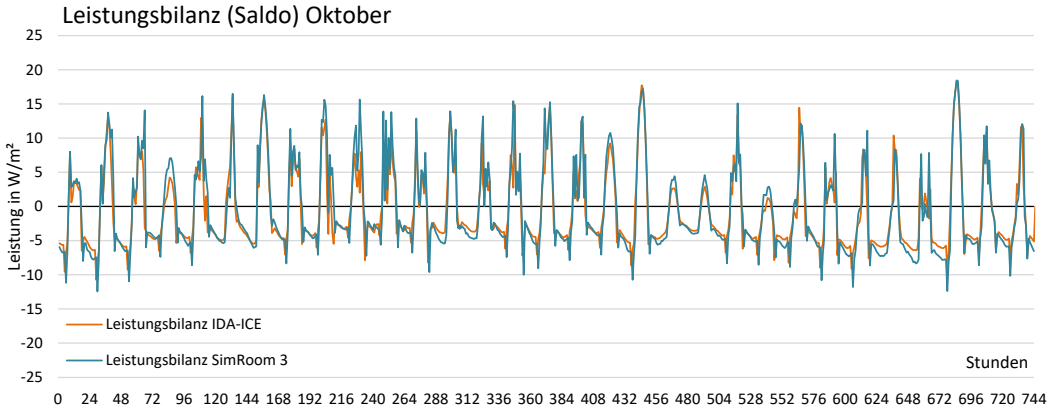

Leistungsbilanz (Saldo) Mai
Leistung in W/m²
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden
0 24 48 72 96 120 144 168 192 216 240 264 288 312 336 360 384 408 432 456 480 504 528 552 576 600 624 648 672 696 720 744

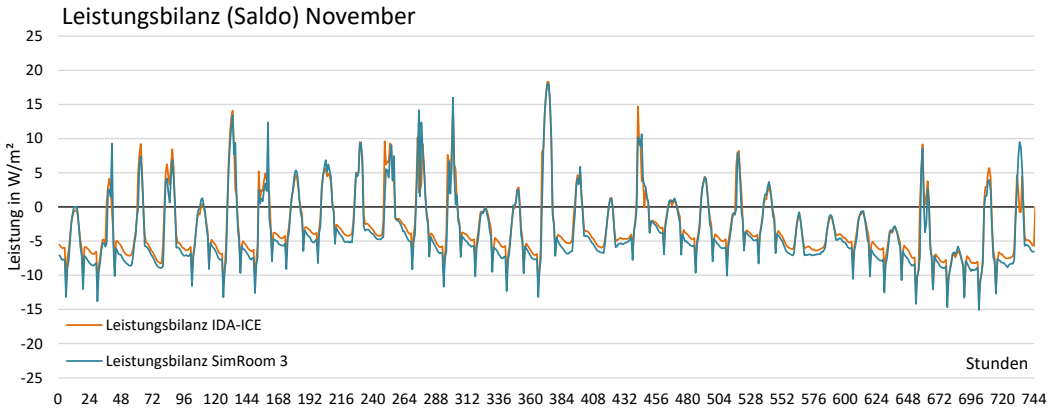

Leistungsbilanz (Saldo) Juni
Leistung in W/m²
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden
0 24 48 72 96 120 144 168 192 216 240 264 288 312 336 360 384 408 432 456 480 504 528 552 576 600 624 648 672 696 720 744


Leistungsbilanz (Saldo) Juli
Leistung in W/m²
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden
0 24 48 72 96 120 144 168 192 216 240 264 288 312 336 360 384 408 432 456 480 504 528 552 576 600 624 648 672 696 720 744


Leistungsbilanz (Saldo) August
Leistung in W/m²
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden


Leistungsbilanz (Saldo) September
Leistung in W/m²
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden


Leistungsbilanz (Saldo) Oktober
Leistung in W/m²
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden


Leistungsbilanz (Saldo) November
Leistung in W/m²
Leistungsbilanz IDA-ICE
Leistungsbilanz SimRoom 3
Stunden

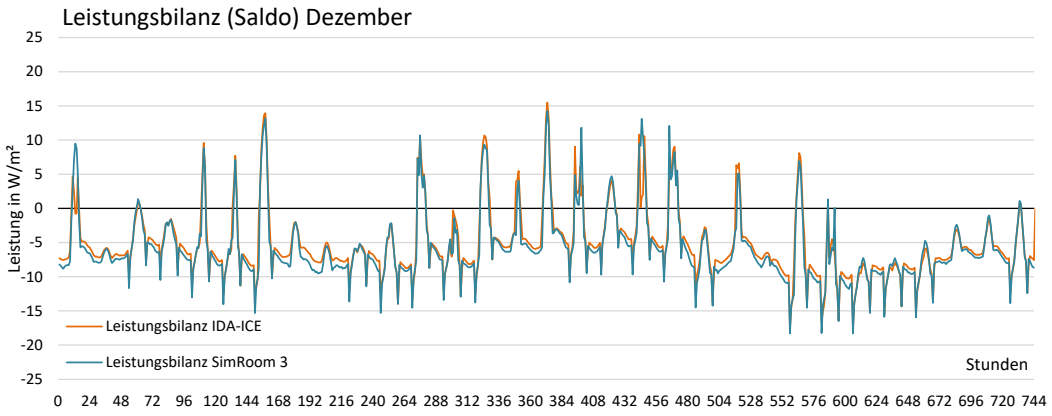


Abbildung 7.1: Leistungsbilanz der Variante NWG - A_BS_OS_FE30_G010_I150_NL0 für alle Monate.