



Goblet Lavandier & Associés

Ingénieurs Conseils S.A.

Department of Energy and Building Physics

Beeinflussung der nutzungsabhängigen Fensterlüftung infolge von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle

Bericht zur Modifikation der Rechenregeln des "*Réglement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation*" zur verbesserten Abbildung eines standardisierten des Nutzerverhaltens für Gebäude mit unterschiedlichem Wärmeschutzstandard.

Infiltrations- und Fensterlüftungsverluste in der Energiebilanz

– Arbeitsbericht –

Auftraggeber	Wirtschaftsministerium Luxemburg
Bearbeitung	Markus Lichtmeß Goblet Lavandier & Associés
Datum	09. Juli 2014
Version	1.0

1 Aufgabenstellung

2008 wurde der Energiepass in Luxemburg für Wohngebäude erfolgreich eingeführt. Zwei Jahre später folgte die Einführung des Energiepasses für Nichtwohngebäude. Derzeit wird ein zentrales Energiepass-Register für Wohngebäude lanciert, in dem alle bisher erstellten und alle neuen Energieausweise zentral abgelegt werden sollen. Mithilfe dieser Datenbank erhält man einen guten energetischen Überblick über den Gebäudebestand in Luxemburg und sie eröffnet zum Beispiel die Möglichkeit, Förderungen im Bereich der Gebäudemodernisierung zielgerichteter zu gestalten. Zudem soll der kürzlich in der Software "LuxEeB-Tool" eingeführte Plausibilitätscheck weiter ausgebaut werden, wofür statistische Analysen aus einer möglichst großen Gebäudestichprobe erforderlich sind. Neben diesen Effekten können die Informationen aus der Datenbank auch genutzt werden, um die Berechnungsregeln der Verordnung für Wohngebäude zu überprüfen.

Die Berechnung der Energieeffizienz erfolgt im System des Energiepasses aus gutem Grund nutzerbereinigt – sprich mit einem standardisierten Nutzer. Dies ist erforderlich, um die Energieeffizienz von Gebäude unabhängig von dem Nutzerverhalten bereinigt zu bewerten. Es macht nämlich einen deutlichen Unterschied im Endenergiebedarf, ob im selben Gebäude eine 6-köpfige Familie oder eine Einzelperson lebt. Diese reale Verbrauchsdifferenz darf *nicht* mit in die neutrale energetische Bewertung eines Gebäudes einfließen, denn nur so können Gebäude energetisch miteinander verglichen werden [1]. In Luxemburg werden Gebäude hinsichtlich ihrer Energieeffizienz mit Buchstaben von A (beste) bis I (schlechteste) klassifiziert – ähnlich wie bei Kühlschränken. Da das Klassifizierungssystem, bzw. die Klassengrenzen zur Einordnung, mit dem gleichen Bilanzmodell bestimmt wurden, wie es auch zur Bewertung eines Gebäudes verwendet wird, spielt die Höhe des ausgewiesenen Heiz-, End- und Primärenergiebedarfs nur eine untergeordnete Rolle. Entgegen der in letzter Zeit häufig geäußerten Kritik am System zum Luxemburger Energiepass (z. B. in [2]) ist die Klassifizierung bzw. Einordnung und Bewertung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Energieeffizienz im Luxemburger Energiepasssystem eindeutig.

Allgemein ist es natürlich wünschenswert, wenn im Mittel der berechnete Bedarf gut mit dem gemessenen Verbrauch übereinstimmt. Insbesondere dann, wenn aus der Berechnung Modernisierungsempfehlungen abgeleitet werden sollen. Längst bekannt ist, dass mit schlechter werdendem Wärmeschutz der Unterschied zwischen Verbrauch und Bedarf wächst. Dabei überschätzt die Berechnung in der Regel den realen Verbrauch bei Gebäuden mit schlechtem Wärmeschutz. Für Gebäude mit hohem Wärmeschutz (Niedrigenergie- und Passivhäuser) werden die Wärmeströme rechnerisch gut abgebildet und die Bedarfs- und Verbrauchswerte liegen näher aneinander. Für diesen Abschnitt: [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8],[9], [10], [11], [12].

Diesbezüglich sind in [1] mögliche Bilanzanpassungen (Standardisierung des Nutzerverhaltens in Abhängigkeit vom Wärmeschutz des Gebäudes, d. h. eine funktionale Abhängigkeit vom Wärmeschutzniveau) für die Luxemburger Verordnung für Wohngebäude beschrieben, die zu einer besseren Übereinstimmung von berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch beitragen. So kann das Nutzerverhalten standardisiert abgebildet und dem realen Verhalten angenähert werden, indem zum Beispiel die Teilbeheizung einiger Räume bei Gebäuden mit schlechtem Wärmeschutz unterstellt wird.

Im Zuge der Überarbeitung der allgemeinen Bilanzierungsregeln sind auch Anpassungen im Bereich der Lüftungswärmeverluste erforderlich [1]. Im aktuellen Bilanzmodell werden die Lüf-

tungsverluste bzw. die Luftwechsel, bestehend aus den Anteilen Fensterlüftung, mechanische Lüftung, Infiltration und Restluftwechsel durch Benutzung, additiv zueinander bewertet [13]. Für die praktische Berücksichtigung des Nutzungsverhaltens kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die nutzerabhängige manuelle Fensterlüftung in Abhängigkeit zur realen Luftverschlechterung im Gebäude erfolgt. Gerade in sehr undichten Gebäuden können die Infiltrationsverluste (z. B. durch undichte Fenster) zu einem hohen ungewollten Luftaustausch führen. Je niedriger der Luftwechsel durch Infiltration ist, umso mehr muss über Fenster oder lüftungstechnische Maßnahmen gelüftet werden [14]. Wobei hier insbesondere die Grundlüftung zum bauphysikalischen Feuchteschutz (Feuchteabfuhr) beachtet werden muss [15].

Entgegen der häufig anzutreffenden Meinung, dass luftdichtes Bauen schädlich wäre, oder das Gebäude "atmen" müssen, können Leckagenströme infolge undicht ausgeführter Konstruktionen, je nach Vorkommen in der Gebäudehülle, zu signifikanten Bauschäden führen und sind eine häufige Ursache für feuchtebedingte Bauschäden. Strömt feuchtwarme Raumluft durch eine undicht ausgeführte Konstruktion von innen nach außen, so kann es dort sehr schnell zu einer unzulässigen Feuchteanreicherung kommen, da beim Abkühlen der Luft Wasser in der Konstruktion auskondensiert, die dann zu Bauschäden führt [16], [17]. Deshalb sind bei der Planung von Gebäuden (Neubau und Modernisierung) Luftundichtigkeiten unbedingt zu vermeiden. Gleichzeitig trägt der Luftaustausch durch Infiltration teilweise zum Austausch der verbrauchten Raumluft bei [15], wodurch sich das Bedürfnis des Nutzers, die Fenster zum Lüften öffnen zu müssen, reduziert kann. Um dieser Annahme Rechnung zu tragen, wird ein erweitertes Bilanzmodell zur Integration in das "Reglement grand-ducal vom 30. November 2007" [13] vorgestellt, mit dem ein Teil der ungewollten Infiltrationslüftungsverluste zum hygienischen Fensterluftwechsel angerechnet werden kann. Dadurch verringern sich die Lüftungswärmeverluste infolge der angesetzten Fensterlüftung – insbesondere ist dies in undichten Gebäuden ausgeprägt.

Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass die modifizierten Lüftungswärmeverluste im Falle der Fensterlüftung zum einen standardisiert bewertet und zum anderen die Klassengrenzen für die Heizwärme-, die Primärenergie- und die Umweltklasse an die neue Rechenregeln angepasst werden, damit sich die Bewertung bzw. Klassifizierung bestehender Gebäude nicht verändert.

1.1 Berechnungsregeln

Gemäß den Bilanzregeln des Reglements grand-ducal vom 30. November 2007 über die energetische Bewertung von Wohngebäuden [13] setzen sich die Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes aus folgenden Bilanzanteilen additiv zusammen:

- Lüftungswärmeverluste infolge einer Fensterlüftung mit der Randbedingung, dass der hygienische Mindestluftwechsel von $n_{\text{hyg}} = 0,35 \text{ h}^{-1}$ sichergestellt wird.
- Lüftungswärmeverluste infolge einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung, mit der Randbedingung, dass der hygienische Mindestluftwechsel von $n_{\text{hyg}} = 0,35 \text{ h}^{-1}$ sichergestellt wird. Zur Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung wird der hygienische Luftwechsel mit dem Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnungseinheit bewertet ($n_{\text{hyg,WRG}} = n_{\text{hyg}} \cdot (1 - n_{\text{WRG}})$). Für mechanisch gelüftete Räume wird kein zusätzlicher Fensterluftwechsel angesetzt.
- Lüftungswärmeverluste infolge Infiltration (Undichtigkeiten der Gebäudehülle).
- Lüftungswärmeverluste (Restluftwechsel) infolge der sachgemäßen Benutzung des Gebäudes, welches nicht dem zielgerichteten Lüften dient ($n_{\text{rest}} = 0,05 \text{ h}^{-1}$).

1.1.1 Bilanzierung 2007

Der Bilanzluftwechsel n (energetisch wirksamer Luftwechsel) ist gemäß der Verordnung über die Gesamt-Energieeffizienz von Wohngebäuden [13] wie folgt zu bestimmen.

a) Gebäude ohne Lüftungsanlage

$$n = 0,35 + n_{50} \cdot e + 0,05$$

b) Gebäude mit Lüftungsanlage

$$n = \frac{\dot{V}_{L,m}}{V_n} \cdot (1 - \eta_L) \cdot (1 - \eta_{EWT}) + n_{50} \cdot e + 0,05$$

c) Gebäuden kombiniert mit und ohne, oder mehreren Lüftungsanlagen

$$n = \frac{\sum_i (\dot{V}_{L,m,i} \cdot (1 - \eta_{L,i}) \cdot (1 - \eta_{EWT})) + V_r \cdot 0,35}{V_n} + n_{50} \cdot e + 0,05$$

$$V_r = V_n - \sum_i V_{r,L,i}$$

wobei

0,05	h^{-1}	Gebäuderestluftwechsel durch die bestimmungsgemäße Benutzung des Gebäudes gemäß Verordnung.
0,35	h^{-1}	Hygienischer Mindestluftwechsel des Gebäudes gemäß Verordnung.
0,10	h^{-1}	Anzusetzender Mindestfensterluftwechsel.
n	h^{-1}	Effektiver (energetisch wirksamer) Luftwechsel.
η_L	-	Wärmebereitstellungsgrad des Wärmerückgewinnungssystems unter Betriebsbedingungen.
η_{EWT}	-	Wärmebereitstellungsgrad des Erdwärmetauschers.
n_{50}	h^{-1}	Luftdichtheitswert der thermischen Gebäudehülle.
e	-	Koeffizient für die Abschirmung des Gebäudes.
V_n	m^3	Beheiztes Gebäudeluftvolumen.
$\dot{V}_{L,m,i}$	m^3/h	Zeitlich gewichteter Betriebsvolumenstrom einer Lüftungsanlage, bei mehreren Anlagen mit Index i .
V_r	m^3	Raumluftvolumen, als Teil des beheizten Gebäudeluftvolumens, welches nicht über Lüftungsanlagen ausgetauscht wird.
$V_{r,L,i}$	m^3	Raumluftvolumen, als Teil des beheizten Gebäudeluftvolumens, welches über Lüftungsanlagen ausgetauscht wird, bei mehreren Räumen mit dem Index i .

1.1.2 Vorschlag: Bilanzierung 2014

Zur Einbeziehung des Beitrags des Infiltrationsluftwechsels zum hygienischen Luftwechsel ist der nutzungsabhängige Fensterluftwechsel anzupassen. Dies ist für den Fall a) "Gebäude ohne Lüftungsanlage" und den Fall c) "Gebäude kombiniert mit und ohne, oder mehreren Lüftungsanlagen" erforderlich. Für den Fall b) "Gebäude mit Lüftungsanlage" ist keine Modifikation erforderlich, da der hygienische Luftwechsel ausschließlich über die mechanische Lüftung erfolgt. Durch Anpassung des Fensterluftwechsels an die vorhandenen Infiltrationslüftungsverluste können die Gleichungen a) und c) wie folgt modifiziert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Teil der Infiltrationsverluste zum hygienischen Fensterluftwechsel beitragen können und der Grundfensterluftwechsel mindestens $0,1 h^{-1}$ beträgt.¹

a) Gebäude ohne Lüftungsanlage

$$n = \max(0,10; 0,35 - f_{50,inf} \cdot n_{50} \cdot e) + n_{50} \cdot e + 0,05$$

¹ Da Undichtigkeiten meist nicht gleichmäßig auf die Gebäudehülle verteilt sind und aufgrund der Tatsache, dass größere Leckagen auch in einzelnen Räumen vorkommen können, kann nicht der gesamte Anteil des infiltrationsbedingten Luftwechsels als hygienische Grundlüftung für das gesamte Gebäude angerechnet werden. Der anrechenbare bzw. wirksame Infiltrationsluftwechsel ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig und kann nach DIN 1946-6 bestimmt werden [13]. Im Rahmen dieser Anpassung wurde eine Bewertung für eine mittlere eingeschossige Wohnung gemäß den Randbedingungen nach DIN 1946-6 Anhang I [15] durchgeführt und mit dem Infiltrationsluftwechsel verglichen, der sich gemäß den Rechenregeln der Energieeinsparverordnung für Wohngebäude [2] ergibt. Der durchschnittliche Beitrag zum hygienischen Luftwechsel beträgt etwa 1/3 des gesamten Infiltrationsluftwechsels. Im Fall des Einsatzes einer mechanischen Lüftungsanlage wird der Infiltrationsluftwechsel nicht zum hygienischen Luftwechsel angerechnet, da der Luftwechsels durch Undichtigkeiten keinen Einfluss auf die Betriebszeiten oder den Betriebsvolumenstrom einer nicht bedarfsgeführten Lüftungsanlage hat und die Verluste als zusätzlicher Wärmeverlust in der Energiebilanz auftreten.

b) Gebäude mit Lüftungsanlage

$$n = \frac{\dot{V}_{L,m}}{V_n} \cdot (1 - \eta_L) \cdot (1 - \eta_{EWT}) + n_{50} \cdot e + 0,05$$

c) Gebäuden kombiniert mit und ohne, oder mehreren Lüftungsanlagen

$$n = \frac{\sum_i (\dot{V}_{L,m,i} \cdot (1 - \eta_{L,i}) \cdot (1 - \eta_{EWT})) + V_r \cdot \max(0, 10; 0,35 - f_{50,inf} \cdot n_{50} \cdot e)}{V_n} + n_{50} \cdot e + 0,05$$

$$V_r = V_n - \sum_i V_{r,L,i}$$

wobei

$f_{50,inf}$

-

Bewertungsfaktor zur Berücksichtigung des Beitrages des Infiltrationsluftwechsels am hygienischen Grundluftwechsel bei Fensterlüftung, Standard¹ = 1/3.

1.2 Einfluss auf den Bilanzluftwechsel

In folgenden Bildern wird der Einfluss des Infiltrationsluftwechsels auf den nutzungsabhängigen Fensterluftwechsel gemäß den beschriebenen Gleichungen aus Abschnitt 1.1.2 dargestellt.

Luftwechsel bei Fensterlüftung

Für Gebäude ohne raumluftechnische Anlage, also für Gebäude mit Fensterlüftung, zeigt sich eine Reduzierung des Fensterluftwechsels in Abhängigkeit des vorhandenen n_{50} -Wertes (Luftdichtheitswert). Die gepunkteten Linien in den Diagrammen entsprechen jeweils dem Gesamt-Bilanzluftwechsel. Bei sehr undichten Gebäuden ($n_{50} = 10 \text{ h}^{-1}$) reduziert sich der Gesamt-Bilanzluftwechsel um etwa $0,23 \text{ h}^{-1}$, das entspricht rund 21 %, während bei dichten Gebäuden ($n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$) der Einfluss mit $0,01 \text{ h}^{-1}$ (rund 3 %) erwartungsgemäß gering ausfällt.

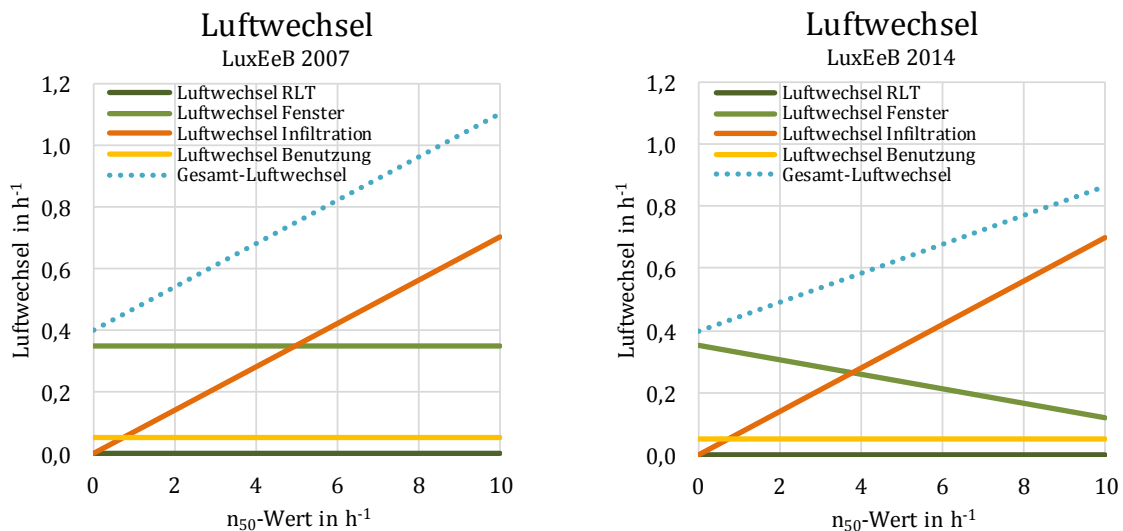


Abbildung 1: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit Fensterlüftung.

Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der Gesamt-Bilanzluftwechsel für das jeweilige Berechnungsverfahren. Im rechten Bild entspricht der hellgrüne Teil eines Gesamtbalkens dem anteiligen Infiltrationsluftwechsel am hygienischen Luftwechsel.

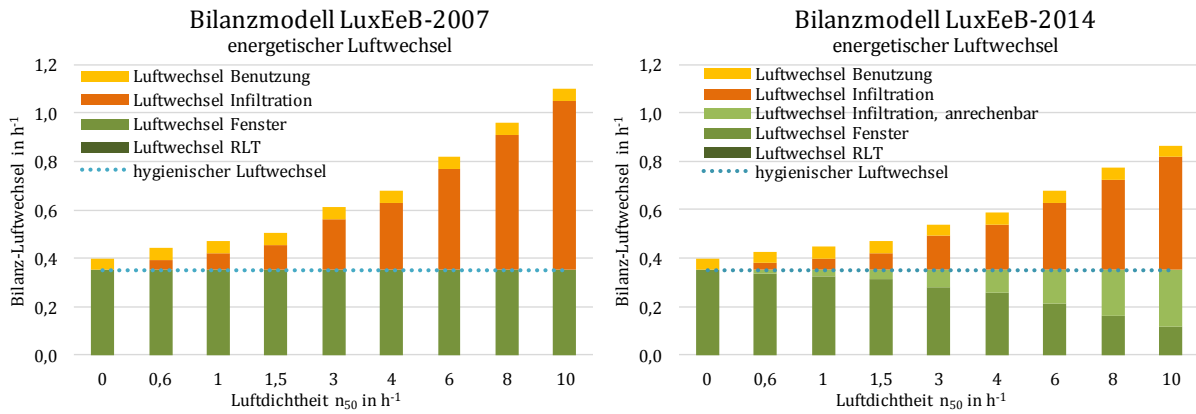


Abbildung 2: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit Fensterlüftung.

Luftwechsel bei mechanischer Lüftung

Wird eine mechanische Lüftung für alle Räume angesetzt, ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Bilanzregeln 2007 und dem Vorschlag zur Anpassung (2014). Die Bilanz-Luftwechsel beider Verfahren sind gleich und die Infiltrationslüftungsverluste haben keinen energierelevanten Beitrag zur Reduzierung des erforderlichen hygienischen Luftwechsels, da bei nicht bedarfsgeführten Lüftungsanlagen kein direkter Zusammenhang zwischen realer Luftverschlechterung und des Betriebsvolumenstroms bzw. der Anlagenbetriebsdauer besteht.

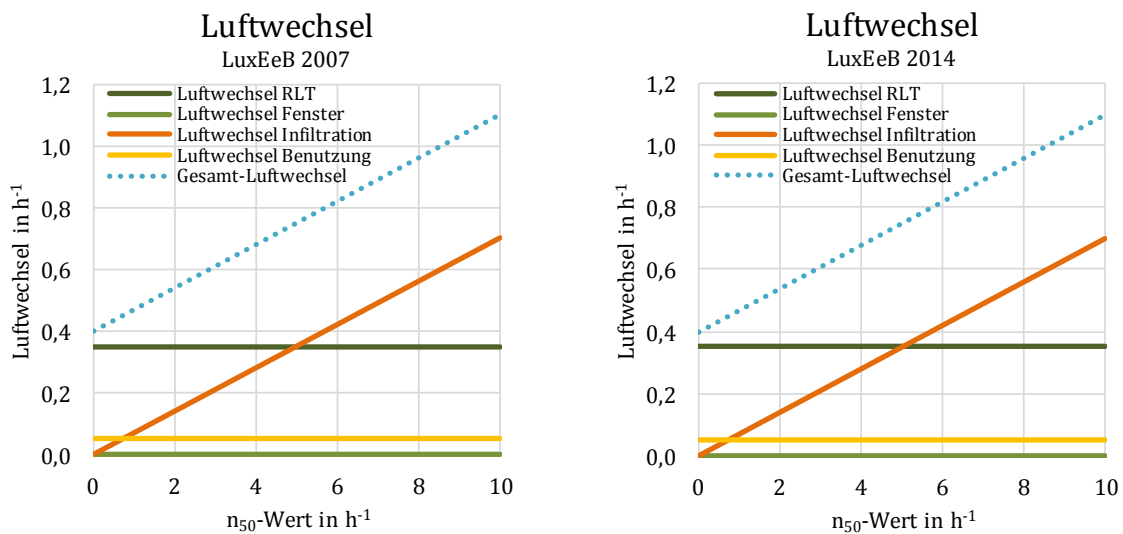


Abbildung 3: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit Lüftungsanlage.

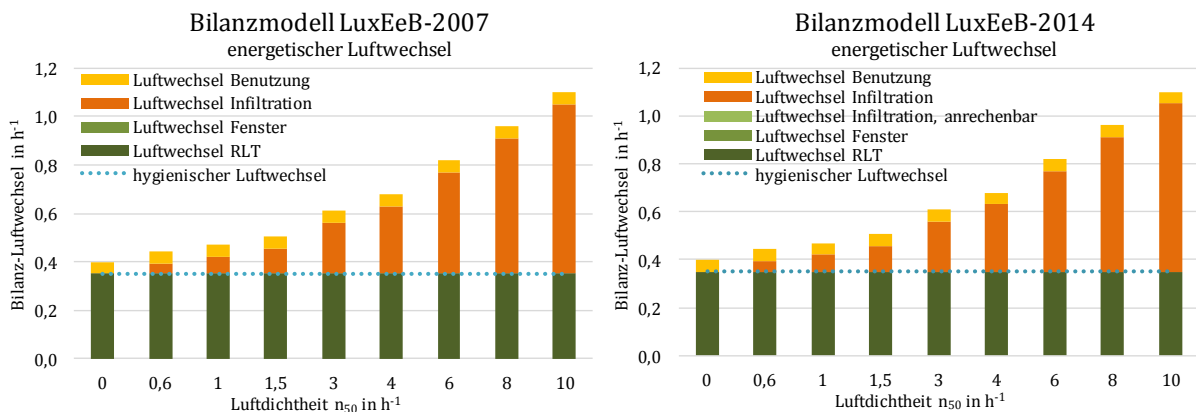


Abbildung 4: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit Lüftungsanlage.

Luftwechsel bei teilweiser mechanischer Lüftung (50% von A_n)

Wird nur ein Teil des Gebäudes über eine Lüftungsanlage belüftet gilt Fall b) als Bilanzgleichung für den Luftwechsel. Da der Einfluss des Infiltrationsluftwechsels im Bilanzmodell nur auf den Anteil der manuellen und nutzerabhängigen Fensterlüftung Einfluss nimmt, ist auch nur für diese Bereiche mit einer Reduzierung des Luftwechsels zu rechnen. Abbildung 3 zeigt die Luftwechsel auf das gesamte Gebäude bezogen. Für die mit Fenster gelüfteten Bereiche greift die Minimalanforderung aus Abschnitt 1.1.2 mit einem Fensterluftwechsel von mindestens $0,1 \text{ h}^{-1}$. Dieser wird hier anteilig und bezogen auf das gesamte Gebäude dargestellt.

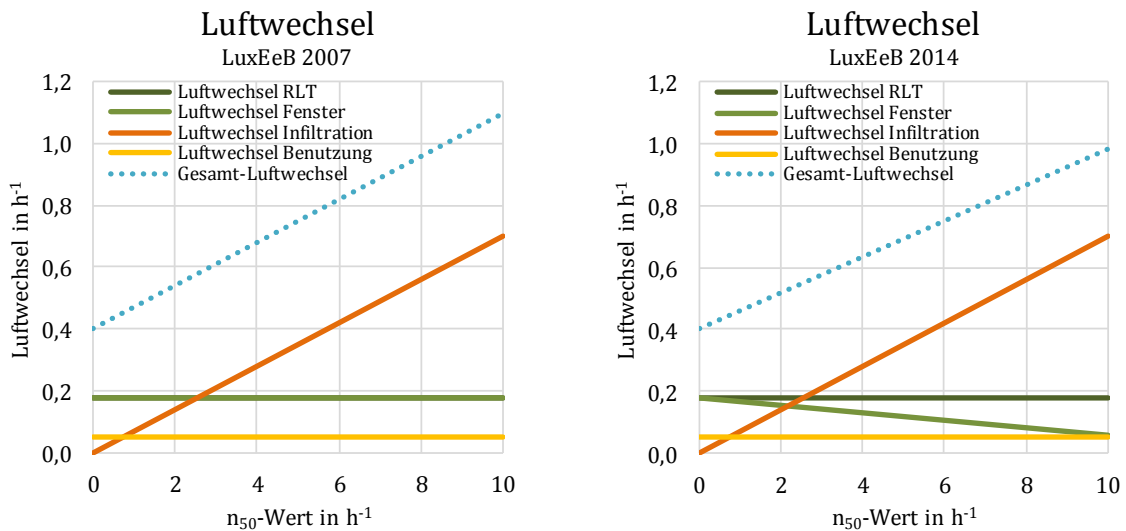


Abbildung 5: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit teilweiser mechanischer Belüftung (hier 50% der Energiebezugsfläche A_n).

Das Gebäude wird zu 50 % mechanisch und zu 50 % über Fenster gelüftet. Im linken Bild sind die entsprechenden Luftwechsel (Fenster und RLT) über alle Luftdichtheiten gleich aufgeteilt. Im rechten Bild ist dies nur bei einer idealen Luftdichtheit von Null der Fall (praktisch nicht erreichbar). Je undichter die Gebäudehülle ist desto größer wird auch der Anteil dieser Undichtigkeiten am hygienischen Luftwechsel und führt zu einer Reduktion des Fensterluftwechsels für den betroffenen Gebäudeteil.

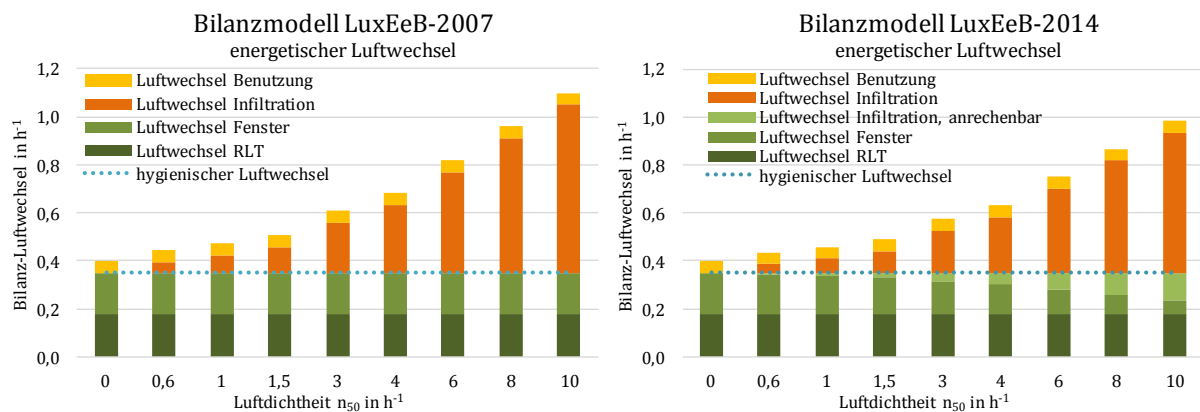


Abbildung 6: Bilanz-Luftwechsel gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für ein Gebäude mit teilweiser mechanischer Belüftung (hier 50% der Energiebezugsfläche A_n).

Gebäude mit und ohne mechanische Lüftung nach DIN V 18599-2:2011-12

In der DIN V 18599-2 [18] wird der Einfluss der Infiltration auf den nutzerabhängigen Fensterluftwechsel berücksichtigt und zum Vergleich in folgenden Bildern dargestellt. Dabei ist zu be-

achten, dass der nutzungsbedingte Mindestaußenluftwechsel für Wohngebäude $0,5 \text{ h}^{-1}$ beträgt, wodurch sich allgemein etwas höhere Luftwechselraten ergeben.² Gemäß DIN 18599-2 wird für alle Fälle eine pauschale Fensterlüftung $n_{\text{win,min}}$ von mindestens $0,1 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Dies führt im Falle des Einsatzes von Lüftungsanlagen führt, im Vergleich zur reinen Fensterlüftung, zu deutlich höheren Gesamtluftwechseln. Auch bei rechnerischer Berücksichtigung des Effektes einer Wärmerückgewinnung für das Lüftungsgerät in der Energiebilanz kann dies, insbesondere bei Gebäuden mit sehr hohem Wärmeschutz (Passivhaus), zu einer Überschätzung des Lüftungswärmebedarfs führen.

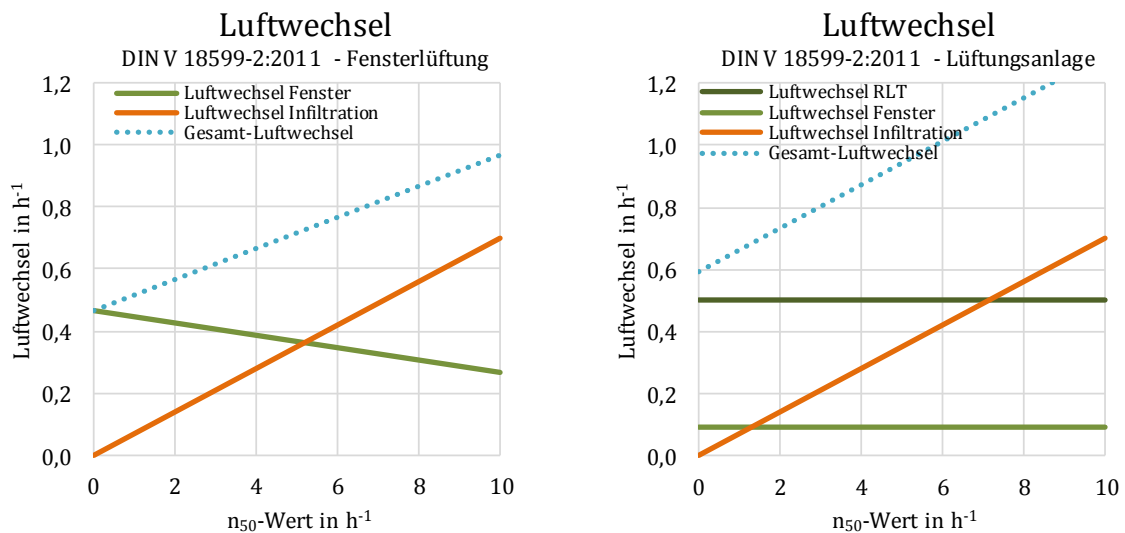


Abbildung 7: Bilanz-Luftwechsel nach DIN V 18599-2:2011-12 [18] mit und ohne Lüftungsanlage.

Vergleich zwischen Verordnung 2007, Vorschlag 2014 und DIN V 18599-2

Abbildung 8 zeigt zusammenfassend die Gesamt-Bilanzluftwechsel gemäß aktuellem Reglement 2007 [13], der vorgeschlagenen Modifizierung aus Abschnitt 1.1.2 und vergleichend nach DIN V 18599-2 [18]. Mit der vorgeschlagenen Modifizierung wird der Fensterluftwechsel deutlich reduziert und die Beeinflussung in Abhängigkeit des n_{50} -Wertes liegt mit der DIN 18599-2 auch ähnlichem Niveau.

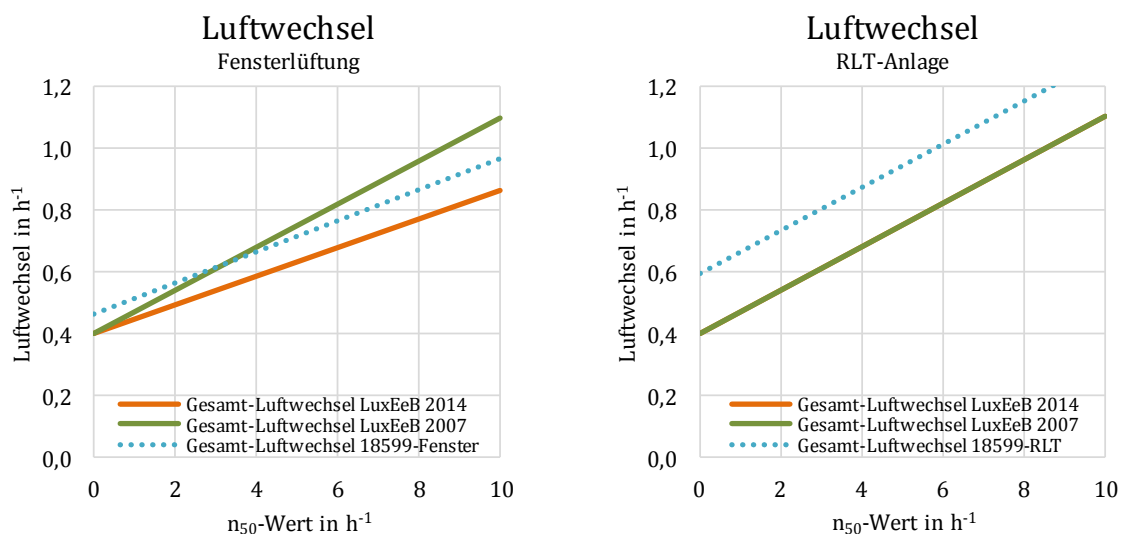


Abbildung 8: Gesamt-Bilanzluftwechsel mit und ohne Lüftungsanlage.

² Dargestellt wird der resultierende Luftwechsel inklusive dem Einfluss der saisonalen Anpassung des Fensterluftwechsels als Monatsmittelwert für die Heizperiode von jeweils Oktober bis März.

1.3 Einfluss auf die Energiebilanz

Neben dem Einfluss auf den Bilanz-Luftwechsel sind die Auswirkungen auf die Energiebilanz von Interesse. Hohe Gebäudeundichtigkeiten gehen meist auch mit einem schlechten Wärmeschutz der Gebäude einher. Mit ineffizienterem Wärmeschutz der Gebäudehülle steigt jedoch auch der relative Einfluss der Transmissionswärmeverluste gegenüber den Lüftungswärmeverlusten. Aus diesem Grund wird sich der durch die Infiltrationslüftungsverluste angerechnete Teil moderat in der Energiebilanz auswirken. Dennoch ist die Anrechnung ein Baustein von vielen, um den durch eine Berechnung prognostizierten Energiebedarf näher an praktische Messwerte heranzuführen.

Einfache Bilanzierung der Lüftungswärmeverluste

Die Auswirkungen auf die energetischen Lüftungswärmeverluste werden in folgendem Abschnitt dargestellt. Die Lüftungswärmeverluste lassen sich gemäß einer einfachen Jahres-Heizperiodenbilanz in Anlehnung an [3] und [4] nach folgender Gleichung bestimmen.

$$Q_L = c_{PL} \cdot n \cdot V_n \cdot F_{Gt} \quad \text{kWh/a}$$

Der Heizgradtagzahlfaktor F_{Gt} kann nach folgender Beziehung ermittelt werden.

$$F_{Gt} = (\theta_i - \theta_{e,m}) \cdot h_{HP} \cdot 0,024 \quad \text{kKh/a}$$

Zur Bestimmung des spezifischen Lüftungswärmeverlusts q_L ist der Lüftungswärmeverlust Q_L mit der Energiebezugsfläche A_n zu bewerten. Das Gebäudeluftvolumen wird gemäß der Verordnung aus der Energiebezugsfläche A_n (konditionierter Teil der Nettogrundfläche) und einem pauschalen Wert für die lichte Raumhöhe h_r von 2,5 m bestimmt.³ Das Raumluftvolumen V_n wird nach folgender Formel berechnet:

$$V_n = A_n \cdot h_r \quad \text{m}^3$$

Eingesetzt in die Gleichung zur Berechnung der Lüftungswärmeverluste Q_L ergibt sich

$$Q_L = c_{PL} \cdot n \cdot A_n \cdot h_r \cdot F_{Gt} \quad \text{kWh/a}$$

und bezogen auf die Energiebezugsfläche A_n kann der spezifische Lüftungswärmeverlust q_L bestimmt werden:

$$q_L = c_{PL} \cdot n \cdot h_r \cdot F_{Gt} \quad \text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

wobei

Q_L	kWh/a	Jährliche Lüftungswärmeverluste
c_{PL}	Wh/(m ³ ·K)	spezifische Wärmekapazität von Luft, Standard = 0,34 Wh/(m ³ ·K)
n	h ⁻¹	effektiver (energetisch wirksamer) Luftwechsel
V_n	m ³	Nettoraumluftvolumen
F_{Gt}	kKh/a	Heizgradtagzahlfaktor, Standard = 73,5 kWh/a ⁴
θ_i	°C	mittlere Bilanz-Innentemperatur während der Heizperiode, Standard = 20 °C
$\theta_{e,m}$	°C	mittlere Monatsmitteltemperatur während der Heizperiode, Standard = 3,2 °C ⁴
h_{HP}	d/a	Länge der Heizperiode, Standard = 182 d/a ⁴
0,024	kh/d	Stunden am Tag / 1000 zur Umrechnung auf kh

³ Der Pauschalwert von 2,5 m für die lichte Raumhöhe dient dazu den Lüftungsbedarf bei großen Raumhöhen nicht zu überschätzen.

⁴ Die relevanten Daten für die Heizperiodenbilanz wurden aus den Klimadaten des Reglements grand-ducal vom 30. November 2007 über die energetische Bewertung von Wohngebäuden [3] für das Winterhalbjahr Oktober bis März abgeleitet.

Darstellung der Energiekennwerte

Das linke Bild der Abbildung 9 sowie Tabelle 1 zeigen die jährlichen Lüftungswärmeverluste für den Fall eines nur über Fenster gelüfteten Gebäudes. Die Energiekennwerte sind auf einen Quadratmeter Energiebezugsfläche angegeben. Mit steigender Undichtigkeit (n_{50} -Wert) steigt auch die Differenz im jeweiligen jährlichen Lüftungswärmeverlust. Bei sehr dichten Gebäuden ($n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$) ist der Beitrag der Infiltrationsluftwechsels am Fensterluftwechsel mit unter $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ vergleichsweise gering. Bei einem sehr undichten Gebäude ($n_{50} = 10 \text{ h}^{-1}$) beträgt der Unterschied rund $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Im rechten Bild der Abbildung 9 wird von einer vollständigen Belüftung des Gebäudes mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ($n_{\text{WRG}} = 80 \%$) ausgegangen. Erwartungsgemäß ergibt sich kein Unterschied bei den spezifischen Lüftungswärmeverlusten.

Tabelle 1: Spezifische Lüftungswärmeverluste gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für den Fall mit Fensterlüftung.

Bilanzregel	Einheit	$n_{50} = 0$	$n_{50} = 0,6$	$n_{50} = 1$	$n_{50} = 1,5$	$n_{50} = 3$	$n_{50} = 4$	$n_{50} = 6$	$n_{50} = 8$	$n_{50} = 10$
2007	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	25,0	27,6	29,4	31,6	38,1	42,5	51,2	60,0	68,7
2014	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	25,0	26,7	27,9	29,4	33,7	36,7	42,5	48,3	54,2
Differenz	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	0,0	0,9	1,5	2,2	4,4	5,8	8,7	11,7	14,5

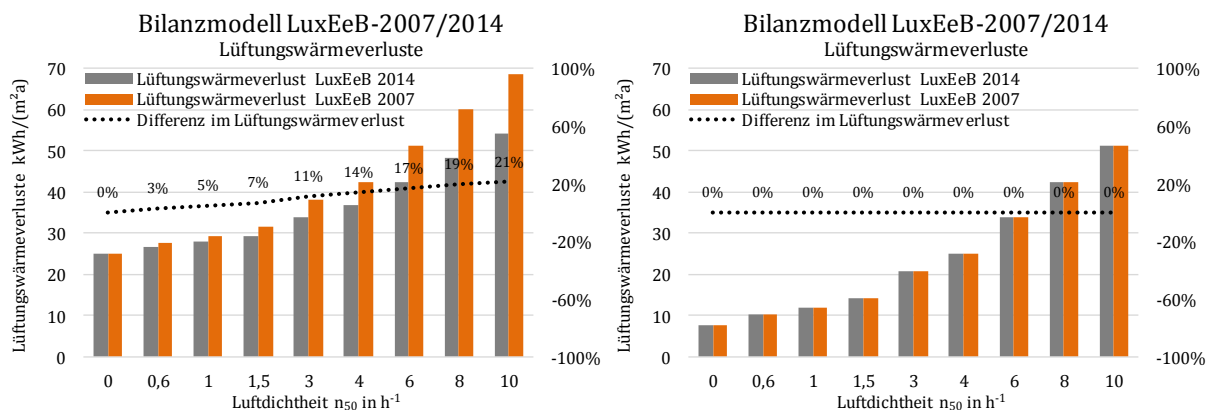


Abbildung 9: Spezifische Lüftungswärmeverluste gemäß den Rechenregeln 2007 und 2014 für den Fall mit Fensterlüftung (linkes Bild) und den Fall mit Lüftungsanlage und 80% WRG (rechtes Bild).

2 Fazit

Die systematischen Unterschiede zwischen berechnetem Energiebedarf und gemessenen Verbrauchswerten haben vielfältige Ursachen. Tendenziell wird der berechnete Energiebedarf bei Gebäuden mit schlechtem Wärmeschutz und hoher Luftundichtigkeit überschätzt. Für neue Gebäude mit gutem Wärmeschutz (ab Wärmeschutzklasse D) kann eine deutlich bessere Übereinstimmung festgestellt werden [1]. Die erforderlichen Modifikationen sind demnach insbesondere für bestehende Gebäude mit schlechtem Wärmeschutzniveau erforderlich.

Neben der Anpassung des physikalischen Bilanzmodells und der Einbeziehung eines standardisierten Nutzereinflusses auf z. B. die Temperierung und Nutzung aller Räume in einem Gebäude, ist die Berücksichtigung des Beitrags des Infiltrationsluftwechsels am Fensterluftwechsel ebenfalls eine weitere Komponente die zur besseren Übereinstimmung von berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch beiträgt.

Mit der in Abschnitt 1.1.2 vorgestellten Modifikation der Bilanzmethode des Reglements grand-ducal vom 30. November 2007 über die Energieeffizienz von Wohngebäuden [13] kann eine

standardisierte und systematische Reduzierung der Lüftungswärmeverluste in Abhängigkeit der Luftdichtheit des Gebäudes bei Fensterlüftung bestimmt werden.

Zur Überprüfung der Auswirkungen auf die Gesamt-Energiebilanz eines Gebäudes und zur Überprüfung des Einflusses auf den Abgleich zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch, müssen statistische Analysen über eine entsprechend große Stichprobe von Gebäuden durchgeführt werden. Nach Abschluss des geplanten Energiepass-Registers steht hierfür eine umfangreiche Datenbank zur Verfügung.

In einem Forschungsvorhaben können auf der Basis dieser Datenbank mithilfe multipler Regressionsanalysen zum einen die Parameter identifiziert werden, die einen Einfluss auf den Unterschied zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch haben und zum anderen über Formulierung entsprechender Anpassungsgleichungen die Bedarfswerte präziser angepasst werden – was jedoch nicht Ziel dieses Berichts ist.

3 Literaturverzeichnis

- [1] M. Lichtmeß, „Ihr Energieverbrauch ist zu gering - Das Problem mit der neutralen Bewertung der Gebäudeenergieeffizienz von Wohngebäuden,“ Chaier Scientifique, Luxemburg, 2013.
- [2] A. Merzkirch, T. Hoos, S. Maas, F. Scholzen und D. Waldmann, „Wie genau sind unsere Energiepässe?,“ Bauphysik 36, Heft 1, Berlin, 2014.
- [3] T. Loga, M. Großklos und J. Knissel, „Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten,“ IWU Institut für wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003.
- [4] T. Loga, „Die Heizperiodenbilanz im Vergleich zum Monatsbilanzverfahren,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2004.
- [5] T. Loga, R. Born und I. Nowak, „Nachweis, Label und Beratung – der Energiepass auf dem Weg ... Dokumentation zur 43. Tagung des Arbeitskreises Energieberatung am 11. Mai 2005,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2005.
- [6] dena, „Energiebedarf und -verbrauch: Welche Einsparung bringt eine energetische Sanierung wirklich?,“ dena Deutsche Energie-Agentur, Darmstadt, 2012.
- [7] T. Loga, „Fachtagung: "Die energetische Zukunft des Wohngebäudebestands. Modelle, Szenarien und Monitoring", Vorstellung TABULA-Konzept,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2014.
- [8] T. Loga, N. Diefenbach and R. Born, „Deutsche Gebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Intelligent Energy Europe, Darmstadt, 2011.
- [9] J. Knissel, R. Alles, R. Born, T. Loga, K. Müller und V. Stercz, „Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2006.
- [10] B. Oschatz, K. Jagnow und D. Wolff, „Leitfaden zum Abgleich Energiebedarf - Energieverbrauch,“ Beuth, EnEV aktuell, Berlin, 2008.
- [11] M. Sunikka-Blank und R. Galvin, Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual consumption, U. o. C. Department of Architecture, Hrsg., Building Research & Information, 40(3), 260-273, 2012.
- [12] T. Loga, R. Born, M. Großklos und M. Bially, „Energiebilanz-Toolbox, Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.
- [13] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation (14.12.2007),“ Service central de législation, Luxemburg, 2007.
- [14] H. Gottschalk, „Lüftung von Wohnungen - Lüftungskonzept DIN 1946-6,“ TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Nürnberg, 2011.
- [15] DIN 1946-6, „Raumluftechnik - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung,“ Beuth, Berlin, 2009.
- [16] A. Maas und A. Geißler, „Dicht ist Pflicht - Neue Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle,“ *Haustechnik*, Nr. 22, 1997.



- [17] Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, „Luftdichtheit von Gebäuden, Schnittstellen zur Qualitätssicherung,“ Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Baden-Württemberg, 2003.
- [18] DIN 18599:2011-12, „Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen,“ Beuth, Berlin, 2011.
- [19] M. Lichtmeß, „Forschungsprojekt Gebäudedatenbank und Plausibilitätscheck im LuxEeB-Tool, interne Ergebnisse,“ Goblet Lavandier & Associés, Luxemburg, 2012.