

Untersuchung des thermischen Komforts und der Luftqualität an vier neuen energieeffizienten Luxemburger Schulen mit und ohne Lüftungsanlagen

Examination of thermal comfort and air quality in four new energy efficient schools in Luxembourg with and without mechanical ventilation

Stefan Maas, Jessica Brensing, Max Flies, Georges Steffgen

Kurzfassung

An vier neuen Schulen in Luxemburg mit sehr guten Primärenergiekennwerten wurden der thermische Raumkomfort und die Luftqualität messtechnisch sowie durch Befragung der Nutzer untersucht. Zwei Schulen werden mit mechanischen Lüftungsanlagen inkl. Wärmerückgewinnung belüftet und zwei ohne, d.h. nur durch manuelles Öffnen der Fenster. Neben der CO₂-Konzentration als Maß für die Luftqualität werden auch alle anderen wichtigen raumklimatischen Parameter gemessen, womit sich die bekannten Komfortindikatoren nach FANGER „Predicted Mean Vote (PMV)“ und der „Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)“ berechnen lassen. Die subjektiven wahrgenommenen Indikatoren der Raumnutzer wurden über einen Zeitraum von vier Wochen mit Fragebogen untersucht. Ein Ziel der Studie war es die freie Fensterlüftung mit der mechanischen Belüftung in Bezug auf die erfassten Parameter und Indikatoren miteinander zu vergleichen.

Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Befragungen. Die Befunde belegen, dass die mechanisch belüfteten Gebäude sowohl in Bezug auf die physikalisch gemessene als auch in Bezug auf die subjektiv wahrgenommene Raumluftqualität allgemein günstigere Werte aufweisen. Allerdings weisen die mechanisch belüfteten Gebäude eine zu niedrige relative Luftfeuchtigkeit auf, die sich jedoch nicht im subjektiven Erleben widerspiegelt. Auch trat in einer der mechanisch belüfteten Schulen eine hohe Luftgeschwindigkeit auf, die durch das subjektiv wahrgenommene Zuglufterleben bestätigt wird. Die Raumtemperatur weist heterogene Werte unabhängig von der Belüftung auf, so dass der PMV einzeln über die verschiedenen Gebäude zu betrachten ist. Raumnutzer sollten stets über ausreichende Beeinflussungsmöglichkeiten verfügen, um individuelle Bedürfnisse umsetzen und technische Unzulänglichkeiten ausgleichen zu können.

Abstract

A study was conducted in four new energy efficient schools in Luxembourg with excellent primary energy consumption values, where the indoor thermal comfort and the air quality was assessed by technical measurements and by surveys. Two schools were equipped with mechanical ventilation with heat recovery and two were without, i.e. ventilation there was manually controlled by opening the windows. Further to the CO₂-concentration as indicator for the air quality all other important comfort parameters were measured, why the well-known indicators according to FANGER could be calculated, i.e. the „Predicted Mean Vote (PMV)“ and the „Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)“. The individual perceived indoor comfort was analyzed by standardized questionnaires for a period of four weeks. One aim of the study was to compare natural ventilation by opening and closing the windows with the mechanical ventilation in all named aspects.

In total there was a good agreement between the measurements and the survey. The results show that in general mechanical ventilation in schools lead to better physical measured values and to better subjective perception of the users. However those buildings suffer from a very low relative humidity, though it is rarely sensed by the occupants. Furthermore, in one of the mechanically ventilated buildings the air velocity was very high and led to draft-perception. The detected air temperature was heterogeneous and independent of the ventilation concept, leading to an individual judgement of PMV for the different buildings. Users should always have the possibility of interaction and control to adjust the indoor climate according to their individual needs and to correct smaller technical shortcomings.

Schlagwörter/ Key words

Raumklimakomfort, Nutzerzufriedenheit, mechanische versus freie Belüftung in energieeffizienten neuen Schulen
Indoor room comfort, user satisfaction, mechanical versus natural ventilation in energy efficient new schools

1 Einleitung

Die Schulumwelt besitzt für die Entwicklung eines Kindes eine hohe Bedeutung [1], insbesondere sind Schulbauten aufgrund ihres potentiell förderlichen Einflusses auf die Entwicklung von großer Relevanz [2]. So können das Raumklima sowie die Raumluftqualität das Lernverhalten von Schülern maßgeblich beeinflussen [3,4]. Dabei stellen die hohe Anzahl von Personen auf begrenztem Raum bei permanenter Abgabe von Wärme, Feuchtigkeit und Kohlenstoffdioxid für die Belüftungskonzepte von Schulen eine besondere Herausforderung dar. Häufig ist festzustellen, dass bedingt durch Energiesparmaßnahmen zu niedrige Belüftungsraten in Schulen auftreten [3]. Ein ausgewogenes Lüftungskonzept ist daher anzustreben, wenn sowohl die Zufriedenheit und das Wohlbefinden der Nutzer als auch eine optimale, möglichst geringe Energienutzung erreicht werden soll. Hierbei können sowohl Konzepte mit einer freien Belüftung durch manuelles Öffnen der Fenster als auch Konzepte mit einer kontrollierten Belüftung durch mechanische Lüftungsanlagen umgesetzt werden. Je nach Anforderung müssen bei der Auswahl eines Konzeptes die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden. Die Effektivität der freien Belüftung ist stark von den außenklimatischen Bedingungen abhängig (Geräuschpegel, Temperatur, Luftqualität), hat jedoch den Vorteil, gut akzeptiert und leicht anpassbar zu sein. Allerdings kommt es im Winter und den Übergangszeiten zu Wärmeverlusten, die sich jedoch in den gemessenen Primärenergiewerten hier

nicht niederschlagen. Diesen Nachteil weist eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung nicht auf und sie gewährleistet eine gute Frischluftzufuhr. Jedoch kann hier oft nur wenig vom Nutzer regulierend eingegriffen werden. Das In-Einklang-Bringen von individuellen Anpassungsmöglichkeiten mit einem energieoptimierten Raumklima stellt demzufolge nach wie vor eine Herausforderung dar [5].

Dabei können Differenzen zwischen dem physikalisch messbaren Raumklima und dessen Komfortbestimmungen sowie dem subjektiv wahrgenommenen Klimakomfort der Raumnutzenden auftreten. Ein bedeutsames Konzept ist in diesem Kontext das vorhergesagte Durchschnittsvotum (Predicted Mean Vote – PMV) nach Fanger [6]. Hierbei ist das vorhergesagte Temperaturerleben einer Gruppe im Raum (thermische Behaglichkeit) die zentrale Zielgröße, welche anhand einer Formel [7] unter Einbeziehung der allgemeinen Raumlufttemperatur, der Luftgeschwindigkeit, der Luftfeuchte, der Strahlungstemperatur sowie dem Bekleidungs- und Aktivitätsgrad der Nutzer berechnet wird oder in direkter Befragung erfasst wird. Der Ergebnisbereich liegt zwischen -3 (sehr kalt) und +3 (sehr warm), wobei 0 als der ideale Zustand angesehen wird (siehe Abbildung 1). Thermische Behaglichkeit ist dann erreicht, wenn das Raumklima im Schnitt als weder zu warm noch zu kalt erlebt wird [6,7].

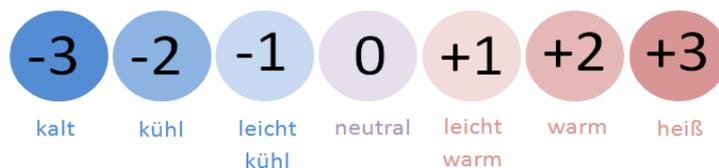


Abbildung 1: Bedeutung des PMV-Index

Vom PMV direkt abhängig ist laut Fanger der Anteil unzufriedener Personen (Predicted Percentage Dissatisfied – PPD) [6]. Angenommen wird, dass selbst bei optimaler thermischer Behaglichkeit (PMV= 0) noch 5% Unzufriedener festzustellen sind. Dieser Anteil steigt, je mehr der PMV-Wert vom Nullpunkt der Skala abweicht (siehe Abbildung 2).

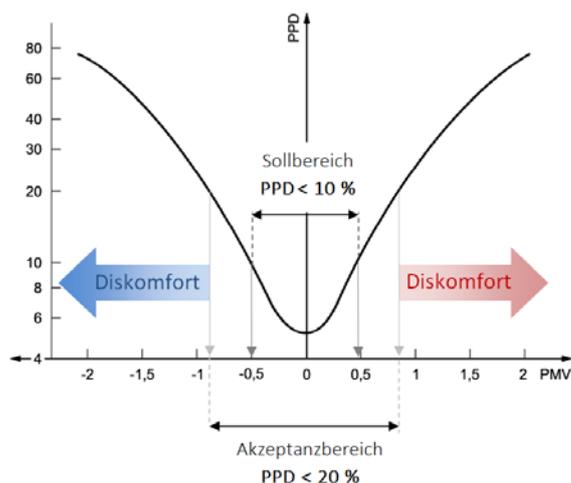


Abbildung 2: Zusammenhang von PPD und PMV

Obwohl einiges an Kritik bezüglich der Anwendbarkeit des Konzepts von Fanger angebracht wird [8-10], ist es dennoch ein etabliertes Konzept (siehe Norm EN 7730).

Ziel der vorliegenden Studie ist die Überprüfung, ob systematische Unterschiede des physikalisch gemessenen und des subjektiv wahrgenommenen Raumklimakomforts zwischen den zwei Belüftungsarten (mechanisch versus frei) in energieeffizienten neuen Gebäuden festzustellen sind. Dabei werden die physikalisch gemessenen mit den subjektiv erlebten Parametern zum einen zwischen den Belüftungsarten, und zum anderen auch deren Ausprägungen innerhalb der beiden Gruppen miteinander verglichen. Aufgrund dieser Vergleiche lassen sich dann Rückschlüsse auf die Umsetzung der Belüftungskonzepte ziehen.

2 Methodik

2.1 Gebäudemerkmale und befragte Raumnutzende

Aus einer bereits vorhanden Stichprobe von 64 nach 1996 erbauten luxemburgischen Schulgebäuden [11] wurden vier Schulgebäude mit sehr guten Primärenergiekennwerten ausgewählt, wobei jeweils zwei Gebäude zentralgesteuert mechanisch und zwei Gebäude frei belüftet wurden. Einige Gebäudemerkmale sind in Abbildung 3 aufgeführt. Der Primärenergiekennwert wurde berechnet als Heizenergie x 1.1 und Gesamtstromverbrauch einschließlich aller Ausstattungstechnik x 2,67 bezogen auf die beheizte Bruttogrundfläche. Primärenergiekennwerte unter 132 kWh/m²a dürfen als energetisch „sehr gut“ eingestuft werden. Die Bezeichnungen „Passivbau“, „Niedrigenergie“ oder „Standardbau“ wurden dabei aus den Planungsunterlagen und Bauvorschriften übernommen. Es sei an dieser Stelle der Hinweis erlaubt, dass sogenannte „Niedrigenergie“ und „Standardgebäude“ dieselben sehr guten Primärenergiekennwerte wie „Passivgebäude“ aufweisen können.

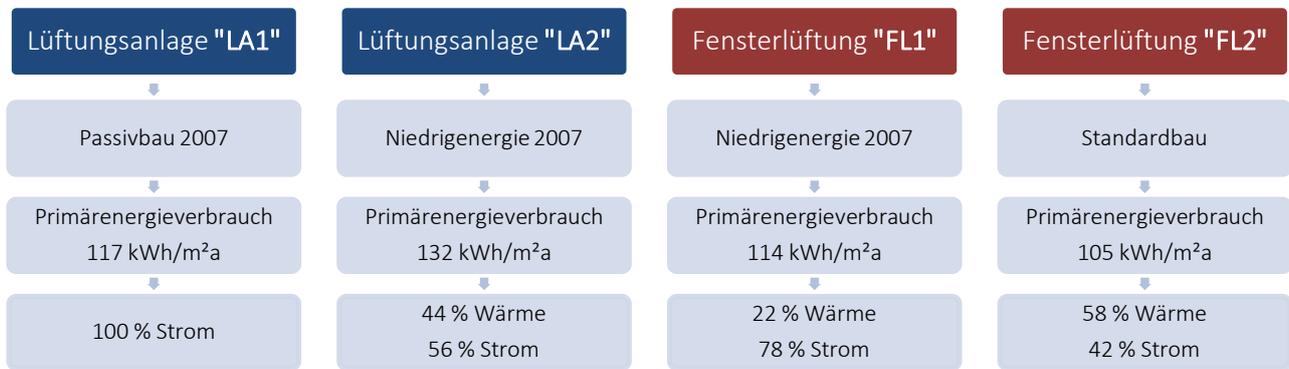


Abbildung 3: Vergleich der vier untersuchten Schuleinrichtungen

Von jeder teilnehmenden Schule wurde jeweils ein Raum untersucht. Als raumnutzende Person wurde jeweils die Lehrperson befragt, die sich hauptsächlich in diesem Raum aufhielt, so dass sich die Stichprobe aus insgesamt vier Lehrpersonen zusammensetzte (männlich= 3, weiblich= 1). Die wesentlichen Auswahlkriterien der Lehrer waren neben einer möglichst hohen Anzahl im Raum verbrachter Stunden auch eine freiwillige Teilnahmebereitschaft an der Studie.

2.2 Studienablauf

Nach Auswahl der Gebäude wurde die Messtechnik pro Gebäude in jeweils einem ausgewählten Raum installiert. Über einen Zeitraum von vier Wochen wurden in je einem Gebäude pro Gruppe für zwei Wochen alle relevanten Parameter kontinuierlich mithilfe des Ahlborn-Messsystems gemessen, in allen vier Gebäuden wurden kontinuierlich Kohlenstoffdioxidgehalt, allgemeine Raumlufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte mithilfe der Wöhlerwürfel gemessen. Die Raumnutzenden wurden einmal wöchentlich anhand eines standardisierten Fragebogens zur subjektiven Wahrnehmung und Zufriedenheit mit den Bedingungen in dem jeweiligen Klassenraum befragt. Der Erhebungszeitraum von vier Wochen lag in der Heizperiode Januar und Februar 2013.

2.3 Messverfahren

2.3.1 Physikalisch-objektive Messungen

Mit Hilfe zweier Messapparaturen (Wöhler CDL 210 und Ahlborn-Messsystem) wurden folgende physikalische Parameter erfasst:

- Kohlenstoffdioxidkonzentration (als Indikator der Luftqualität)
- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit
- Luftgeschwindigkeit gemessen mittels Anemometer

2.3.2 Psychisch-subjektive Messungen

Der verwendete Fragebogen wurde in identischer Weise viermal pro Person (also einmal pro Woche) eingesetzt. An demographischen Variablen wurden lediglich das Geschlecht und die Nationalität erhoben. Anschließend wurde nach Lage des Arbeitsplatzes sowie nach den üblichen Arbeitszeiten gefragt (Beispiel-Item: „Wie viele Stunden verbringen Sie an einem durchschnittlichen Arbeitstag an Ihrem Arbeitsplatz?“) [12]. Außerdem wurde für die Berechnung des PMV der Bekleidungsgrad der Personen erhoben [13]. Dieser wurde in den späteren Berechnungen zur Vereinfachung auf 1 geschätzt. Das Erleben des Raumklimas wurde mittels siebenstufiger Skalierung erfasst, wobei bereits etablierte Items [9, 12,14-15] gegebenenfalls adaptiert wurden (Beispiel-Item: „Wie beurteilen Sie das Raumklima in diesem Klassenraum“: 1 „sehr warm“ – 4 „weder noch“ – 7 „sehr kalt“). Weiterhin wurde eine Bewertung der Raumklima-, Belüftungs- und der Geräuschsituation erfragt [12, 15-16] (Beispiel-Item: „Belüftungssituation insgesamt“: 1 „sehr gut“ – 4 „weder noch“ – 7 „sehr schlecht“). Für die Erhebung der Zufriedenheit mit dem Raumklima wurde angelehnt an [12] folgende fünfstufige Skala verwendet: „Ich bin mit dem Raumklima“: 1 „überhaupt nicht zufrieden“ bis 5 „sehr zufrieden“. Ebenfalls erfragt wurden Veränderungswünsche bezüglich der Temperatur [14] sowie des Luftzuges [12]. Zusätzlich waren im Fragebogen der Stichprobe mit mechanischer Lüftungsanlage Fragen bezüglich der Zufriedenheit und den Änderungswünschen hinsichtlich der Lüftungsanlage enthalten. Außerdem wurden die Lehrpersonen mithilfe eines Leitfadens mündlich befragt.

2.4 Analysemethoden

Von den gemessenen physikalischen Daten wurden nur die üblichen Raumnutzungszeiten ausgewertet. Es wurde die operative, d.h. die gefühlte Temperatur [7] errechnet, die sich aus der mittleren Strahlungstemperatur, die in einer schwarzen Kugel gemessen wird, der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit ergibt. Zur Ermittlung des PMV nach Fanger [6] wurde EN ISO 7730 [7] verwendet, wobei der Bekleidungsgrad mit 1,0 clo festgelegt wurde, was einer normalen winterlichen Bürobekleidung entspricht.

Der Aktivitätsgrad wurde auf 1 mit geschätzt, was einer sitzenden Tätigkeit entspricht. Der PPD ergibt sich dann direkt aus Abbildung 2 bzw. einer Gleichung nach Fanger [6].

Von den vier Lehrpersonen lagen jeweils vier Messzeitpunkte vor, was jeweils der Einschätzung und Bewertung von einer Woche entspricht. Aufgrund des geringen Datenumfangs wurden die subjektiven Daten rein deskriptiv ausgewertet.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden einem unveröffentlichten Bericht entnommen [17].

3.1 Analyse der Luftqualität

Die Luftqualität wurde in 4 Stufen bewertet: CO₂-Werte unter 1000ppm wurden als „sehr gut“ bezeichnet, von 1000 bis 1500ppm als „leicht verbrauchte Luft“ und von 1500 bis 2000ppm als „mäßig verbrauchte“ bewertet. Für Wertebereiche über 2000ppm wurde die Luftqualität mit „schlecht“ bezeichnet. In Abbildung 4 wird die Luftqualität als Prozentsatz der gemessenen Nutzungszeit für alle vier Schulen aufgeführt.

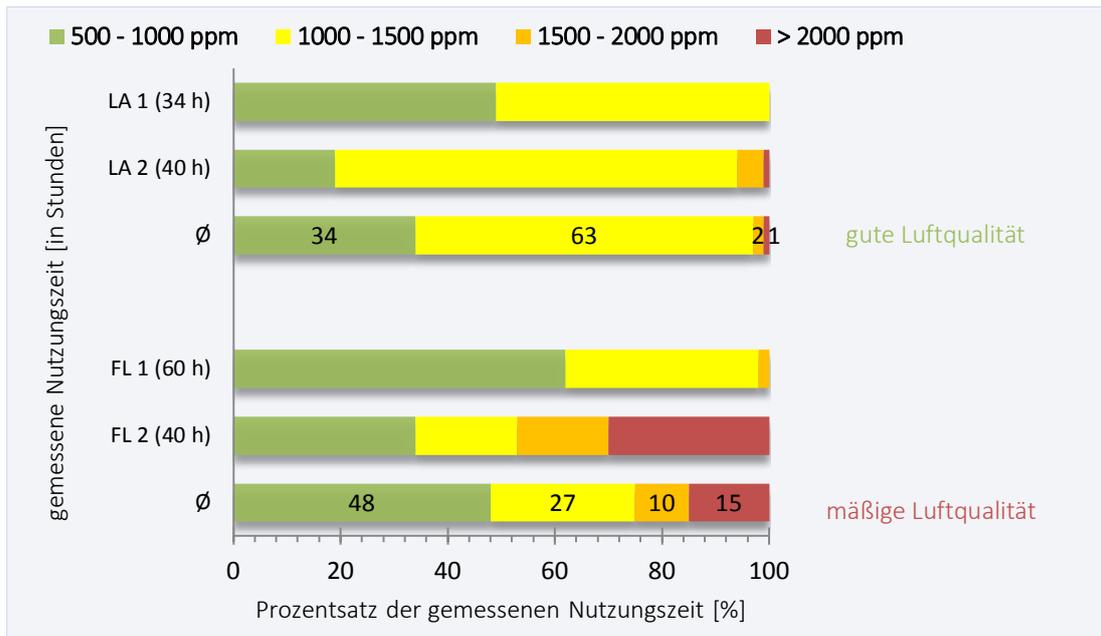


Abbildung 4: Verteilung der gemessenen CO₂-Konzentration

Drei der vier Schulen zeigen überwiegend eine gute Luftqualität, lediglich eine der Schulen mit Fensterlüftung weist zu einem Drittel der Nutzungszeit eine schlechte Luftqualität auf. Im Mittel sind die Schulen mit Lüftungsanlage (LA) als „gut“ und die Schulen mit Fensterlüftung (FL) als „mäßig“ zu beurteilen.

Um die subjektiv wahrgenommene Luftqualität abzubilden, wurden die Einschätzungen der Lehrer auf einer Skala von frisch/unverbraucht bis verbraucht aufgeführt (siehe Abbildung 5). An Schulen mit Lüftungsanlage wurde die Luft allgemein als „eher frisch (3,1)“ erlebt, während sie an Schulen ohne Lüftungsanlage als „ziemlich verbraucht (6,25)“ wahrgenommen wird (Abbildung 5).

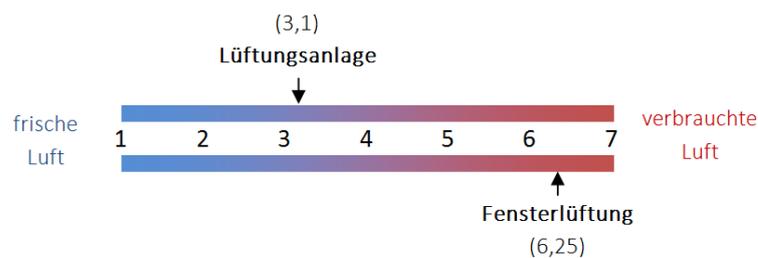


Abbildung 5: Erlebte Luftqualität

Insgesamt zeigt sich hier eine gute Übereinstimmung der physikalischen Werte mit der subjektiven Wahrnehmung als auch ein vorteilhafteres Abschneiden der Schulen mit mechanischer Belüftung.

3.2 Analyse der Raumtemperatur

Abbildung 6 zeigt die gemessenen Werte der allgemeinen Raumlufttemperatur als Prozentsatz der gemessenen Nutzungszeit auf. Dabei werden Temperaturwerte unter 20°C als „kühl“, 20-22°C als „mäßig warm“, 22-24°C als „ziemlich warm“ beziehungsweise zwischen 24-26°C als „warm“ eingestuft. Als optimal gelten Werte um die 22°C bei sitzender Tätigkeit.

Anhand des Vergleichs der Abbildungen 4 und 6 wird ein Zusammenhang zwischen der Luftqualität beziehungsweise des Luftwechsels und der Raumtemperatur erkennbar. Während die Schulen LA 1 und FL 1 eine gute Luftqualität bei gleichzeitig niedrigeren Raumtemperaturen aufweisen, treten in FL 2 hohe Raumtemperaturen bei schlechter Luftqualität auf. Beides passt gut zusammen, weil jede Person ständig etwa 100 W an Wärme abgibt und gleichzeitig CO₂ und Feuchte produziert. Wenn also zu wenig über die Fenster gelüftet wird, wie z.B. in der Schule FL2, steigen die Temperatur und der CO₂-Gehalt.

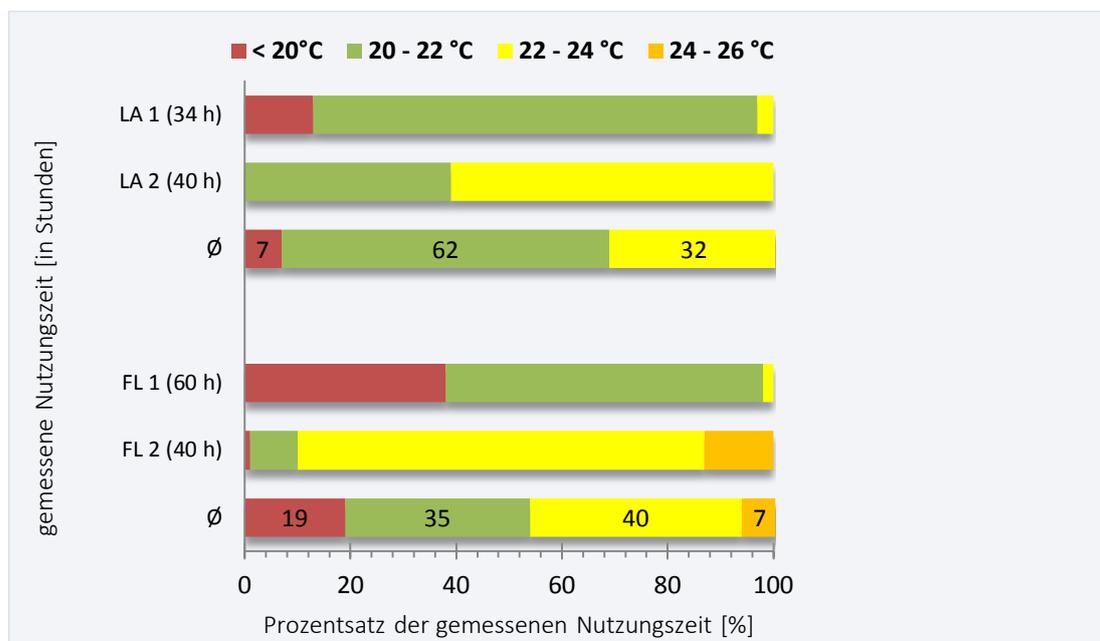


Abbildung 6: Verteilung der gemessenen Raumtemperatur

Abbildung 6 zeigt zudem auf, dass die Raumtemperatur der Schule LA 1 etwas zu gering, die der Schule FL 1 eindeutig zu gering ist. Die besten Temperaturwerte wies Schule LA 2 auf. Im Mittel sind die Schulen mit mechanischer Lüftung (LA) als „etwas kühl“ zu bewerten.

Bezüglich der subjektiven Temperaturwahrnehmung sind Unterschiede bei den LA-Schulen im Vergleich zu den physikalisch gemessenen Werten festzustellen. Während nach Abbildung 6 die Schule LA 1 eher „kühler“ als die Schule LA 2 ist, zeigt die wahrgenommene Temperatur ein umgekehrtes Bild auf: die Schule LA 1 wird als „ziemlich warm“ angegeben, während die Schule LA 2 „eher warm“ bis „weder noch“ erlebt wurde. Hinsichtlich der Schulen mit Fensterlüftung stimmen die Werte weitestgehend überein und Schule FL 1 wird nur sehr geringfügig kühler erlebt als Schule FL 2.

3.3 Analyse der relativen Luftfeuchtigkeit

Bezüglich der relativen Luftfeuchtigkeit werden Werte unter 30% als „trocken“, und zwischen 30 und 40% als „mäßig trocken“ bezeichnet. Als „optimale“ relative Luftfeuchte wird der Wertebereich zwischen 40% und 60% angesehen. Werte über 70% gelten als „feuchte Luft“.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit hinsichtlich der jeweiligen Bereiche auf (angegeben als Prozentsatz der gemessenen Nutzungszeit). Erkennbar ist, dass die relative Luftfeuchtigkeit in Schulen mit mechanischer Lüftungsanlage (LA) deutlich niedriger ist als in Schulen mit Fensterlüftung (FL). Ein Zusammenhang mit den beiden zuvor analysierten Parametern (Luftqualität bzw. Luftwechsel und Raumtemperatur) ist nicht eindeutig möglich, weil die Belegungsdichte der Klassensäle nicht vorliegt und die Menschen die einzige Feuchtequelle im Gebäude sind. Dennoch liegt die Ursache höchst wahrscheinlich in der hohen Luftwechselrate, was ein bekanntes Phänomen bei mechanisch belüfteten Gebäuden ist. Der absolute Feuchtegehalt der Außenluft ist im Winter sehr niedrig und daher nach Erwärmung auch die relative Feuchte. Man müsste also im Winter befeuchten, was aus vielerlei Gründen problematisch ist und daher normalerweise unterlassen wird. Die Schulen mit Fensterlüftung tauschen einfach weniger Luft aus und weisen hingegen häufiger Werte im optimalen Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit, aber dafür höhere CO₂-Werte auf.

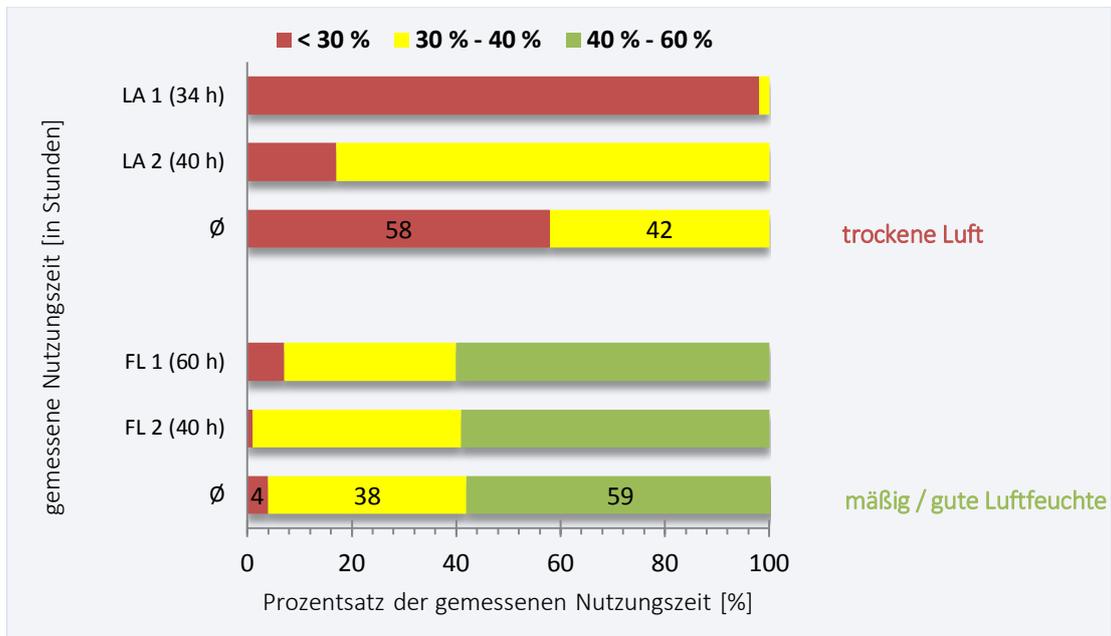


Abbildung 7: Verteilung der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit

Bezüglich der wahrgenommenen Luftfeuchte (Abbildung 8) wurde die Luft in beiden Gruppen als „eher trocken“ bewertet, wobei diese Wahrnehmung in den Schulen mit Fensterlüftung entgegen der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit stärker ausgeprägt war. Allerdings ist bekannt, dass der Mensch keine ausgeprägte direkte Wahrnehmung für die relative Feuchtigkeit hat und diese nur indirekt und langsam bemerkt, wenn sie außerhalb des zulässigen Bereiches von etwa 30% bis 70% liegt. Es kommt beispielsweise bei niedrigen Werten zur Austrocknung der Schleimhäute und Durst und bei hohen Werten im Sommer zu starkem Schwitzen und Erschöpfung.

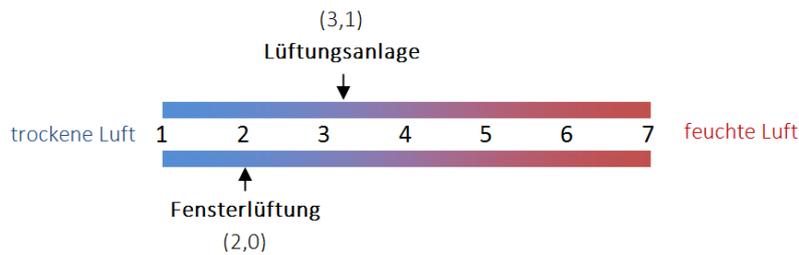


Abbildung 8: erlebte Luftfeuchtigkeit

Insgesamt liegen die Werte innerhalb der jeweiligen Gruppe der Belüftungsart eng beieinander, so dass auf deskriptiver Ebene die Unterschiede zwischen den Gruppen größer sind als in den Gruppen.

3.4 Analyse der Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit in Räumen hat direkten Einfluss auf den thermischen Komfort bzw. den konvektiven Wärmeaustausch zwischen Mensch und Umgebung. Unerwünschte Luftbewegungen rufen besonders bei sitzenden Personen oft das Gefühl von Zugluft hervor. Luftgeschwindigkeiten über 0,2m/s werden als diskomfortabel, Werte unterhalb 0,2m/s als akzeptabel gewertet. Abbildung 9 zeigt die durchschnittlich gemessene Luftgeschwindigkeit in allen vier Schuleinrichtungen.

Die Schule LA 1 wird stark gelüftet und wies dementsprechend eine durchschnittliche Luftgeschwindigkeit auf, welche eindeutig über der Behaglichkeitsgrenze liegt (M= 0,66m/s). Die Werte der Schule FL 1 liegen ebenfalls außerhalb des Komfortbereichs (M= 0,35m/s). In den Schulen LA 2 und FL 2 trat hingegen keine Zugluft auf.

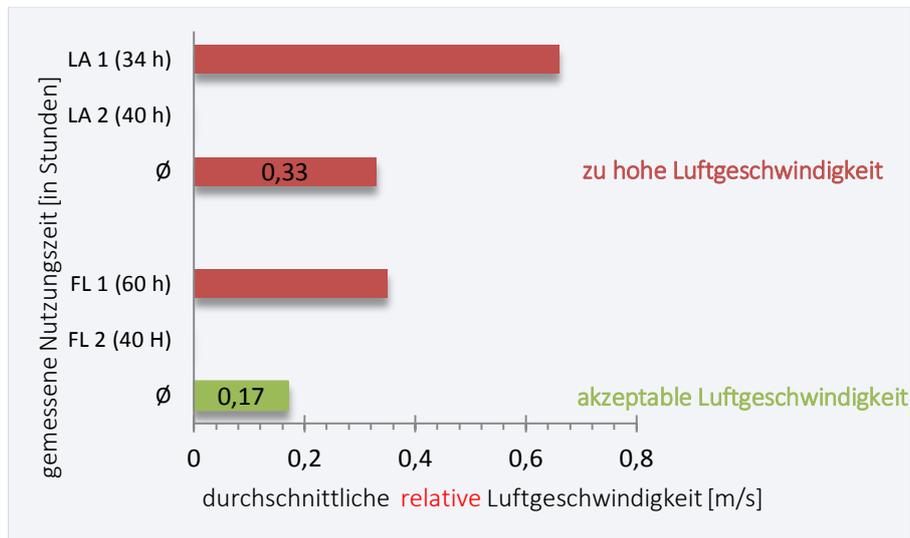


Abbildung 9: gemessene Luftgeschwindigkeit

Das Erleben von Zugluft wurde nur in Schulen mit Lüftungsanlagen auf einer fünfstufigen Skala (1 bedeutet „keine Zugluft“ und 5 „sehr starke Zugluft“) erfasst. Entgegen der gemessenen Werte wurde für Schule LA 1 ein „geringeres“ Zuglufterleben ermittelt als für Schule LA 2. Für Schule LA 1 wurde ein „mäßiges“ Zuglufterleben ($M=2,5$), für Schule LA 2 ein „ziemlich starker“ Luftzug auf der Skala angegeben ($M=4,0$).

Bezüglich des Zuglufterlebens wurden ebenfalls in allen Gruppen Änderungswünsche erfragt, wobei sich die Raumnutzenden mechanisch belüfteter Schulen eher weniger Luftzug, die Lehrer der fensterbelüfteten Schulen eher mehr Luftzug wünschten (Abbildung 10).

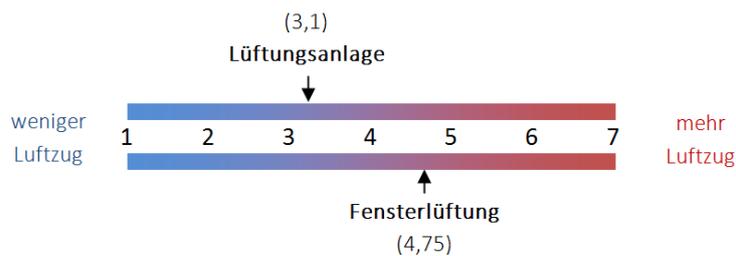


Abbildung 10: Änderungswünsche bezüglich des Luftzugs

Abschließend wurde nach der Einschätzung der Belüftungssituation insgesamt gefragt (Abbildung 11). Im Durchschnitt wurde von den Raumnutzenden die Belüftungssituation der mechanisch belüfteten Schulen besser bewertet als diejenige der freibelüfteten Schulen.

Dabei zeigt sich entsprechend der Werte des physikalisch gemessenen Luftzuges ein besseres Abschneiden der Schule LA 2 ($M=2,3$) mit einer guten bis mäßigen Bewertung bezüglich der Belüftungssituation gegenüber der Schule LA 1 ($M=5,3$). Die Bewertung der Belüftungssituation durch die Schulen mit freier Belüftung reicht von eher schlecht in der Schule FL 1 ($M=5,0$), bis ziemlich schlecht in FL 2 ($M=6,3$).

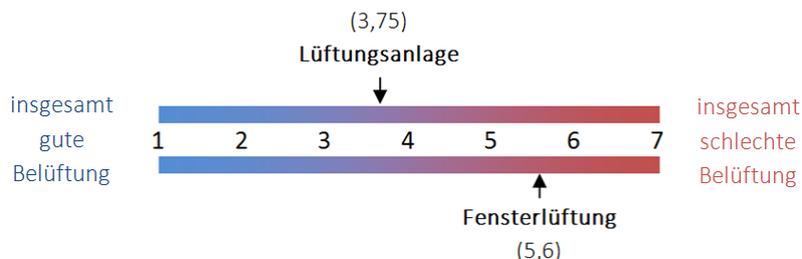


Abbildung 11: Bewertung der Belüftungssituation

3.5 Analyse des thermischen Komforts (PMV)

Zur Ermittlung des thermischen Komforts wurde der Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) verwendet. Die ermittelten Werte werden in Abbildung 12 dargestellt, wobei etwas großzügiger als bei Fanger ein Anteil von bis zu 20% als „zufriedenstellend“

angenommen wird. Ein Anteil Unzufriedener von über 40% gilt hier als „unzufriedenstellende“ Situation, Werte dazwischen als „mäßig zufriedenstellend“.

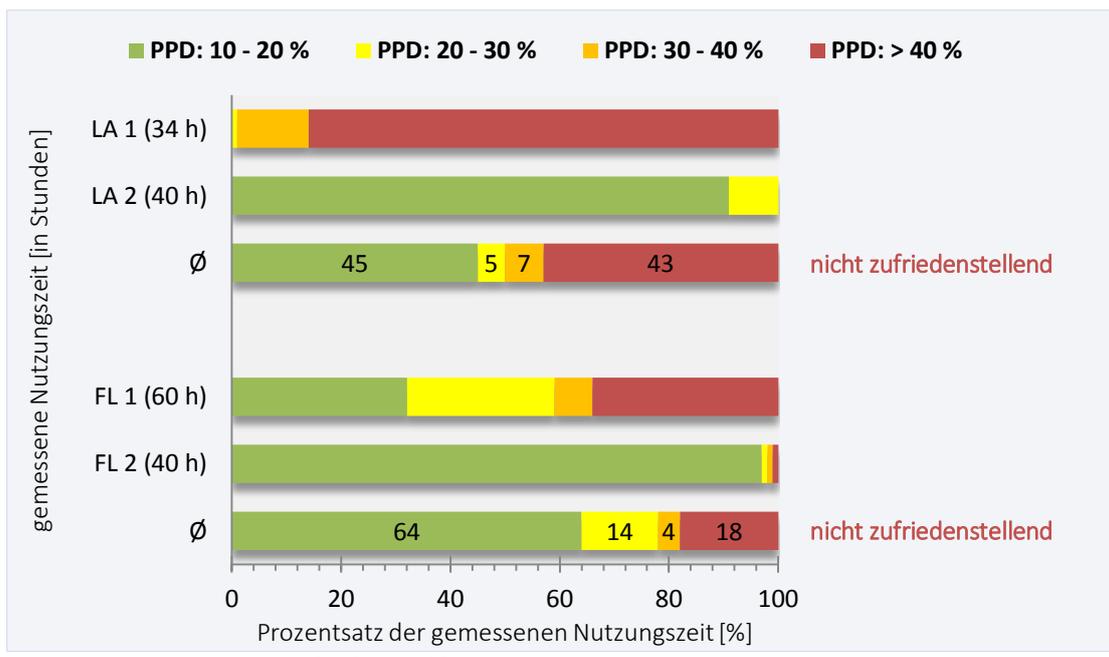


Abbildung 12: Verteilung des errechneten PPD

Entsprechend der gemessenen physikalischen Werte von Schule LA 1 ist ein hoher Anteil Unzufriedener zu erwarten, da allgemein zu hohe Luftgeschwindigkeiten, zu niedrige allgemeine Raumtemperaturen sowie eine zu geringe relative Luftfeuchtigkeit gemessen wurden. In Schule LA 2 hingegen lagen die gemessenen physikalischen Werte mit Ausnahme der relativen Luftfeuchtigkeit eher im optimalen Bereich, weshalb eine allgemein bessere Situation erwartet wird.

In Schule FL 1 wird aufgrund der zu niedrigen Lufttemperaturen bei sonst guten Werten bezüglich der Luftqualität und relativen Luftfeuchtigkeit ein höherer Anteil an unzufriedenen Personen erwartet als an Schule FL 2. Diese weist lediglich ungünstigere Werte bezüglich der Luftqualität und eine etwas zu warme Temperatur auf, wohingegen kaum Zugluft und eine optimale Luftfeuchtigkeit gemessen wurden.

Im Schnitt sollten nach Fanger bei den Schulen mit Lüftungsanlagen (LA) die Hälfte der Nutzer zufrieden sein, bei der Fensterlüftung (FL) ungefähr zwei Drittel. In beiden Fällen wird Fangers Optimum von 5% sehr deutlich überschritten und deshalb abschließend mit „nicht zufriedenstellend“ bewertet.

Erfragt wurde die allgemeine Zufriedenheit auf einer Skala von „nicht zufrieden“ bis „sehr zufrieden“ mit dem momentan herrschenden Raumklima, dessen Durchschnittswerte in Abbildung 13 dargestellt sind.

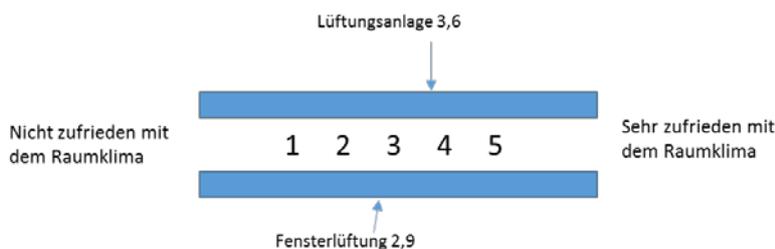


Abbildung 13: Zufriedenheit mit dem Raumklima

Entsprechend dem gemessenen PPD für die mechanisch belüfteten Schulen wird für die Schule LA 1 eine geringe bis mäßige Zufriedenheit (M= 2,8), für die Schule LA 2 dagegen eine große Zufriedenheit (M= 4,5) angegeben (gerundet). Die Zufriedenheitsmittelwerte für die frei belüfteten Schulen liegen hierbei nah beieinander: FL1 erhält M= 3,0 und FL2 einen Mittelwert von M= 2,8.

4 Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine recht hohe Übereinstimmungen zwischen der subjektiven Wahrnehmung und den objektiven physikalischen Werten hinsichtlich der Luftqualität, der erlebten Zugluft sowie des kalkulierten Anteils unzufriedener/wenig zufriedener Personen für mechanisch belüftete Gebäude festzustellen ist. Bezüglich der Temperatur tritt eine tendenzielle Übereinstimmung bei den frei belüfteten Gebäuden ein. Keine Übereinstimmung wurde hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit in allen Gruppen sowie der Temperaturwahrnehmung in mechanisch belüfteten Gebäuden gefunden. Fehlende Zusammenhänge hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit sind bereits belegt, überraschend sind die Ergebnisse hinsichtlich der

Temperaturwahrnehmung sowie des erlebten Luftzuges. Natürlich bleiben messtechnische Unsicherheiten wie z.B. der Standort des Messgerätes.

Im Vergleich der Belüftungsarten sind einige Vorteile für die mechanische Belüftungsgruppe feststellbar, wobei einige differenzielle Effekte hervorzuheben sind. Die Lüftungsanlage der Schule LA 1 führte zu einer hohen Luftgeschwindigkeit, zu einer geringeren Raumtemperatur sowie einer deutlich zu trockenen Luft und entsprechend geringer war die Zufriedenheit ausgeprägt. Die Lüftungsanlage für Schule LA 2 scheint besser auf das Gebäude abgestimmt zu sein, was sich ebenfalls in der Zufriedenheit der raumnutzenden Person spiegelte. Hinsichtlich der frei belüfteten Gebäude treten geringere Unterschiede sowohl im subjektiven Erleben als auch in Bezug auf die Zufriedenheit auf.

Es sei einschränkend darauf hingewiesen, dass der Befragungsstudie nur die Mittelwerte vier verschiedener Lehrer von jeweils einem Raum aus vier unterschiedlichen Gebäuden über vier Wochen vorliegen, ohne dass die Belegungsdichte mit erfasst wurde. Nichts desto trotz erlaubt sie einen interessanten Einblick in raumklimatische Unterschiede zwischen mechanisch und frei belüfteten neuen energieeffizienten Schulen. Dabei zeigte sich, dass unter Heranziehung sowohl subjektiver Indikatoren als auch physikalischer Parameter keine allgemein gültigen Urteile bezüglich der Bevorzugung einer Belüftungsart möglich sind. Vielmehr ist es erforderlich die Gebäude einzeln zu beurteilen und das Belüftungskonzept unter Berücksichtigung der Wahrnehmung der Nutzer abzustimmen. Ausreichende Nutzerkontrollmöglichkeiten sind dabei stets hilfreich, um kleinere Unzulänglichkeiten der Technik auszugleichen und individuelle Wünsche zu berücksichtigen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der Administration des Bâtiments Publiques (ABP) in Luxemburg, sowie den Lehrpersonen und Schulen für die Teilnahmebereitschaft. Frau Johanna Marder und den Herren Alexandru Popescu und Dr. Alexander Merzkirch wird gedankt für die Durchführung der Datenerhebung und Hilfe bei der Auswertung.

Literatur

[1] Durán-Narucki, V.: School building condition, school attendance, and academic achievement in New York City public schools: A mediation model. *Journal of Environmental Psychology* 28(3) (2008), S. 278–286.

[2] Walden, R.: Lernumwelten. In Linneweber, V., Lantermann, E.-D., Kals, E. (Hrsg.): *Spezifische Umwelten und umweltbezogenes Handeln*, S. 151–186. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie 2010.

[3] Wargocki, P., Wyon, D.: Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment* 59 (2013), S. 581–589.

[4] Mendell, M.J., Heath, G.A.: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air* 15(1) (2005), S. 27–52.

[5] Kohler, N.: Zukunftsfähige Gebäude – eine Zieldefinition. In Voss, K., Löhnert, G., Herkel, S., Wagner, A., Wambsganß, M. (Hrsg.): *Bürogebäude mit Zukunft. 2. Überarbeitete Auflage*, S. 2-5. Berlin: SOLARPRAXIS 2007.

[6] Fanger, P.O.: *Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press 1970.

[7] DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005) 2006-05.

[8] Brager, G.S., de Dear, R.: Thermal adaption in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings* 27(1) (1998), S. 83-96.

[9] Hellwig, R. T.: *Thermische Behaglichkeit: Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht* (Dissertation). München: Technische Universität 2005. <http://d-nb.info/978197321/34> (zuletzt geprüft am 06.06.2016)

[10] Van Hoof, J.: Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air* 18(3) (2008), S. 182-201.

[11] Thewes, A.: *Energieeffizienz neuer Schul- und Bürogebäude in Luxemburg basierend auf Verbrauchsdaten und Simulationen*. Aachen: Shaker Verlag 2011.

[12] Wagner, A., Schakib-Ekbatan, K.: *Nutzerzufriedenheit als ein Indikator für die Beschreibung und Beurteilung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag 2010. <http://www.irbnet.de/daten/rswb/10099006608.pdf> (zuletzt geprüft am 06.06.2016)

[13] TU Braunschweig/ Institut für Gebäude- und Solartechnik: F + E Projekt TwinSkin. Validierung von Planungskonzepten für Doppelfassaden bei Bürogebäuden anhand der Betriebs- und Nutzungserfahrungen. Abschlußbericht, Stand 15.09.2008. https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/igs/_Projektarchiv/abschlussbericht_twinskin.pdf (zuletzt geprüft am 06.06.2016)

[14] ASHRAE: ANSI/ ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environmental conditions for Human Occupancy.

[15] Heße, N.: Umweltpsychologische Interventionen – Voraussetzungen für die Erzeugung und Förderung energieeffizienten Lüftungsverhaltens (unveröffentlichte Diplomarbeit). Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität 2009.

[16] Gossauer, E.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Eine Feldstudie. Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz (Dissertation). Karlsruhe: Technische Universität Karlsruhe 2008. http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/EnOB/Nutzerzufriedenheit_in_Buerogebaeuden_-_Diss_Gossauer.pdf (zuletzt geprüft am 06.06.2016)

[17] Brensing, J., Popescu, A., Maas, S., Steffgen, G.: Untersuchung des thermischen Komfort und der Luftqualität an ausgewählten energieeffizienten Luxemburger Schulen (unveröffentlichter Bericht). Luxemburg: Administration des Bâtiments Publics 2014.

Autoren des Beitrags:

Prof. Dr. Ing. Stefan Maas

Professor, Applied Mechanics & Energy Efficiency, Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication, Universität Luxemburg

Dr. Jessica Brensing

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Universität Luxemburg
(jetzt an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes)

Max Flies

Studentische Hilfskraft der Universität Luxemburg

Prof. Dr. rer nat. Georges Steffgen

Professor für Sozial- und Arbeitspsychologie, Universität Luxemburg