

Untersuchung der Luftqualität in einem Passivhaus

CO₂ als Lüftungsparameter

Da die Energiekosten stetig steigen, wird versucht, in Neu- und Altbauten Heizenergie einzusparen. Auf Grund der dichten Bauweise und des Einsatzes von Vollwärmeschutz wird es jedoch immer öfter sinnvoll, kontrollierte Wohnraumlüftungssysteme einzusetzen.

Einerseits tritt so keine Verschlechterung der Raumluftqualität auf, da es vor allem in Räumen mit langer Aufenthaltszeit rasch zu drastischen Verschlechterung der Raumluftqualität kommen kann, andererseits versucht man bauphysikalische Schäden durch Luftfeuchtigkeit zu verhindern, welche auf natürliche Weise durch die kaum mehr vorhandenen Fugen und

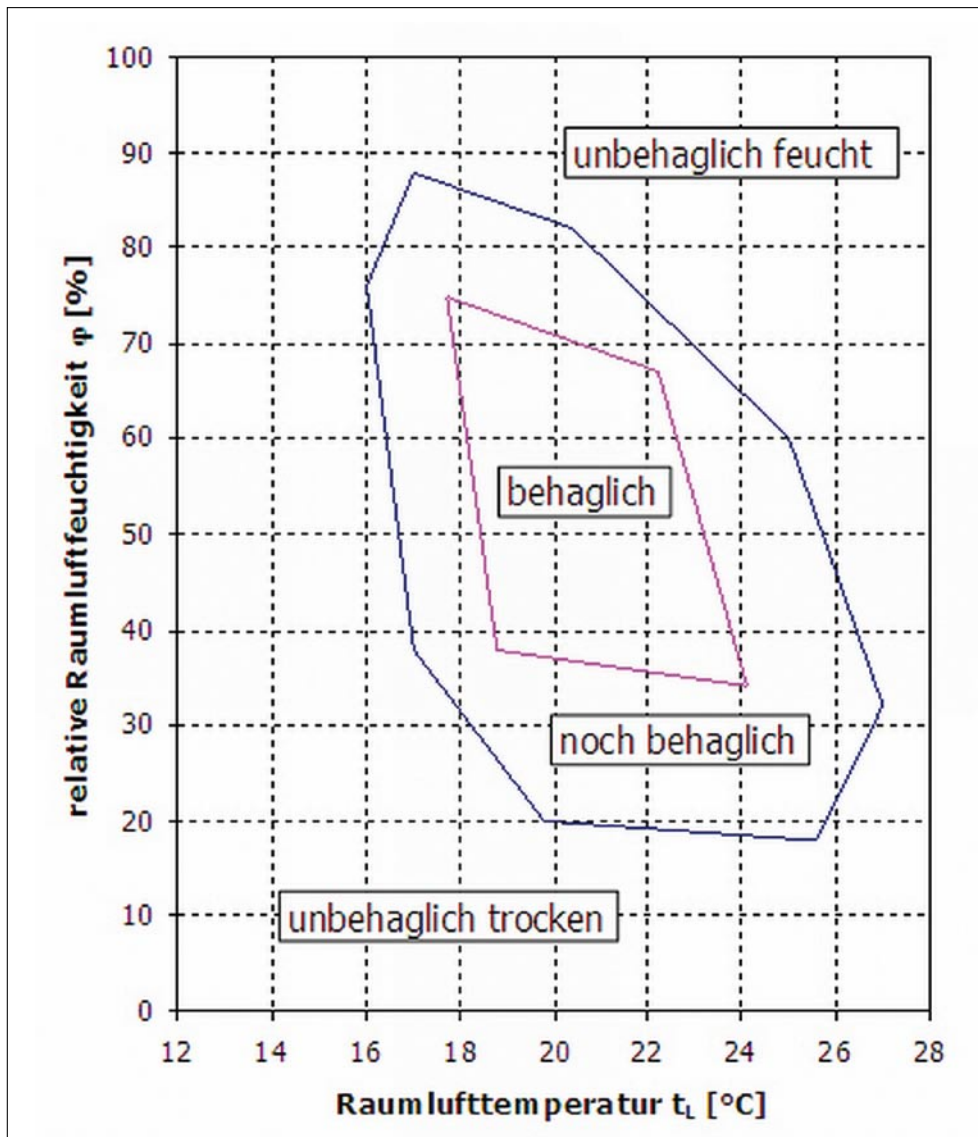
andere Gebäudeundichtigkeiten nicht weggelüftet werden kann. Ein weiterer Vorteil dieser Systeme liegt darin, dass bei Anlagen mit Wärmerückgewinnung Energieverluste durch Fensterlüftung reduziert werden können.

Im Rahmen einer Studie wurde die Luftqualität eines Einfamilienhauses bezüglich CO₂-Gehalt, Raumlufttemperatur und -feuchte analysiert und ausgewer-

tet. Als Untersuchungsobjekt wurde ein bewohntes Passivhaus ausgewählt, da es mit einem Blower-Door Messwert $nd_{50} = 0,15$ und einen Jahresheizwärmebedarf von 5 kWh/(m²a) einen hohen Baustandard aufwies. Ein dichtes Gebäude war in diesem Fall notwendig, um die Messungen des CO₂-Gehaltes nicht durch Undichtigkeiten zu verfälschen. Weiters konnte somit bei definierten Lüftungsstufen für die ausgewählten Räume ein exakter Luftwechsel ermittelt werden.

Ausgehend von Messergebnissen und der Recherche zu CO₂-Ausstoß einer Durchschnittsperson wurden Jahressimulationen betreffend den Verlauf des CO₂-Gehalts und der Raumluftfeuchte in zwei Referenzräumen des Passivhauses berechnet und ausgewertet.

Bild 1: Relative Raumfeuchte in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur.



Raumluftqualität

Als Raumluftqualität werden alle nicht thermischen Aspekte der Raumluft bezeichnet, die Einfluss auf die Behaglichkeit und die Gesundheit haben. Laut Raumnutzer soll die Luft als frisch und angenehm empfunden werden. Des Weiteren darf das Einatmen kein Gesundheitsrisiko darstellen.

Die Luftfeuchte hat auf Grund der Wärmeabgabe des menschlichen Körpers durch Verdunstung einen Einfluss auf die Behaglichkeit. Bei Raumtemperaturen von 20–22°C spielt die Wärmeabgabe durch Verdunstung nur eine geringe Rolle. Bei steigender Temperatur und Feuchte wird der Wasserdampfgehalt der Luft als Wärmegefühl erfasst. Werte zwischen 35% und 70% gelten als behaglich (Bild 1).

In der Heizperiode kann es aber durchaus vorkommen, dass eine relative Feuchtigkeit von unter 35% auftritt. Dies hat eine Austrocknung von Einbauelementen und somit Staubbildung zur Folge. Weiters können eine Austrocknung der Schleimhäute der oberen Luftwege oder trockene Augen daraus resultieren.

Auch bei einer zu hohen relativen Feuchte kann es zu Problemen kommen. Im Sommer kann ein zu hoher Wert schnell ein Schwülegefühl hervorrufen. Die größte Gefahr besteht jedoch durch Schimmelbildung. Dabei schlägt sich die Feuchtigkeit an kalten Stellen nieder und somit wird die ideale Ausgangsbasis für den Schimmel geschaffen. Durch eine hohe Raumluftfeuchte wird ebenfalls das Wachstum von Hausstaubmilben beschleunigt, welche häufig der Auslöser von Allergien sind.

Die Konzentration von CO_2 in Innenräumen dient vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der vom Menschen abgegebenen organischen Emissionen und Geruchsstoffe. Als Produkt der menschlichen Atmung ist der CO_2 -Gehalt der Innenraumluft daher unmittelbar Ausdruck der Intensität der Nutzung eines Raumes.

CO_2 gilt deshalb als Leitparameter für von Menschen verursachte Luftverunreinigungen, da der Anstieg der CO_2 -Konzentration in Innenräumen gut mit dem Anstieg der Geruchsintensität menschlicher Ausdünstungen korreliert. Obwohl für die Innenraumluftqualität die alleinige Bewertung über den Parameter CO_2 dort nicht ausreichend ist, wo Materialien und Baustoffe eingesetzt werden, die selbst Gerüche und/oder geruchsfreie Emissionen abgeben, liefert der Leitwert CO_2 bei Räumen, deren Schadstofflasten hauptsächlich durch Menschen verursacht werden, gute Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden für Innenräume Maximalwerte für die CO_2 -Konzentration festgelegt. Bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts stellte der Hygieniker Max von Pettenkofer fest, dass 1.000 ppm CO_2 das brauchbare Kriterium für gute Raumluftqualität sei. Seitdem ist dieser Wert als „Pettenkofer-Zahl“ bekannt und wird auch heute noch als Maßstab verwendet. In anderen Ländern gelten 1.500 ppm als empfohlener Grenzwert. Auch die DIN 1946 T2 legt 1.500 ppm als Grenzwert fest.

Kohlendioxid eignet sich somit neben der Funktion als Richtwert auch für die Regelung von raumlufttechnischen Anlagen. CO_2 wird dabei, häufig in Verbindung mit der Raumluftfeuchte, als Regelgröße eingesetzt, über die dann der zuzuführende Volumenstrom an Frischluft ermittelt werden kann.

CO_2 -Produktion

Für eine Jahressimulation des CO_2 -Gehalts in der Raumluft ist es notwendig, die Kohlendioxidproduktion eines Menschen zu bestimmen. Zur Berechnung des CO_2 -Ausstoßes einer Person gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die CO_2 -Produktion hängt von verschiedenen Faktoren, wie Geschlecht, Alter, Körpergröße, Gewicht und Aktivitätsgrad ab und kann nach folgenden Berechnungsmethoden bestimmt werden:

- Berechnung nach „Ruch“ und „Patton“ (Beisteiner, 2002).
- Berechnung über das Gewicht und Geschlecht.
- Berechnung über das Alter, Gewicht und Geschlecht.
- Berechnung nach „Harris“ und „Benedict“.
- Berechnung über die Körperoberfläche.

Diese Berechnungsmethoden, mit Ausnahme der Methode nach Ruch und

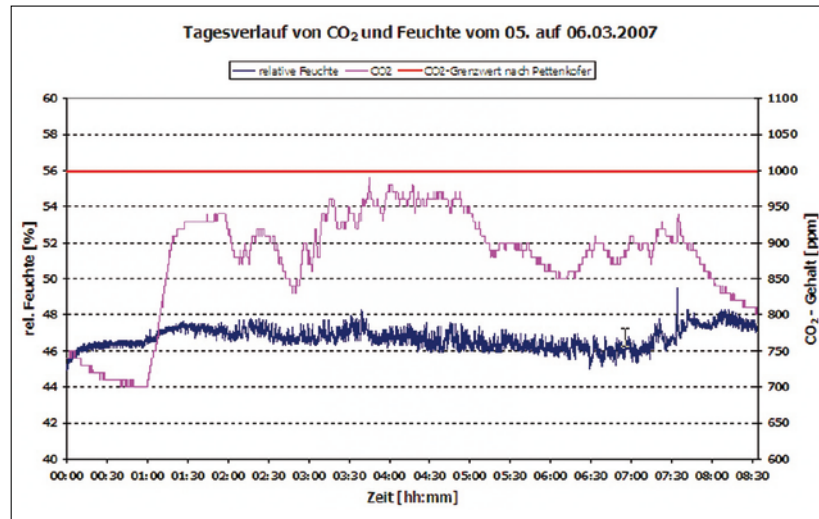


Bild 2: Verlauf der relativen Feuchte und des CO_2 -Gehalts vom 5. auf 6. März 2007.

Patton, liefern nicht direkt den Kohlendioxidausstoß eines Menschen, sondern den Grundumsatz (GU) oder den täglichen Energieumsatz (TEE - total energy expenditure) einer ruhenden Person, der erst umgerechnet werden muss.

Messungen: Elternschlafzimmer mit Lüftungsbetrieb

Dieser Raum ist in den Nachtstunden mit zwei erwachsenen Personen belegt. In Bild 2 ist der Anstieg des CO_2 -Gehalts

von rund 700 ppm um 01.00 Uhr auf rund 930 ppm um 01.30 Uhr deutlich ersichtlich. In der Abbildung ist der Abfall des CO_2 -Gehalts der Raumluft mit dem Verlassen des Raumes deutlich um 07.30 Uhr ersichtlich. Dabei fällt der CO_2 -Gehalt um ca. 150 ppm innerhalb von einer Stunde. Zu erwähnen ist aber vor allem, dass der CO_2 -Grenzwert nach Pettenkofer zu keinem Zeitpunkt überschritten wird und somit eine behagliche Luftqualität erhalten werden kann. Kurzzeitige Abschwächungen des

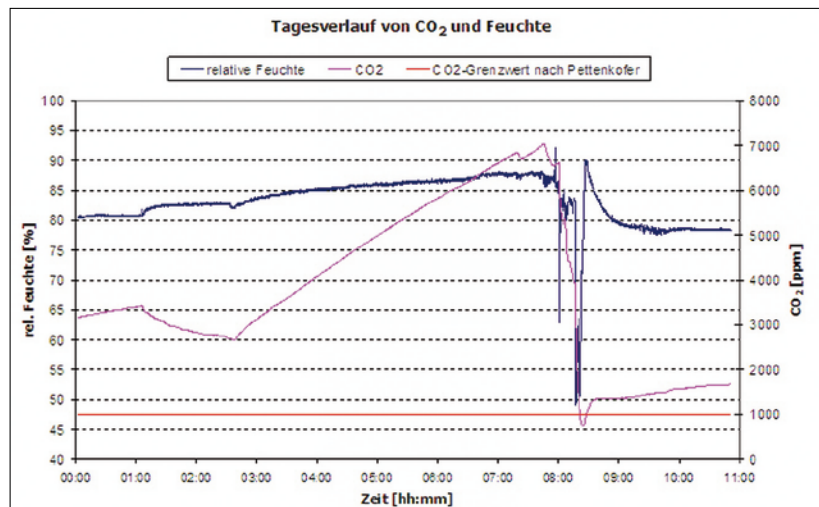


Bild 3: Verlauf der relativen Feuchte und des CO_2 -Gehalts im Betrieb ohne Lüftung.

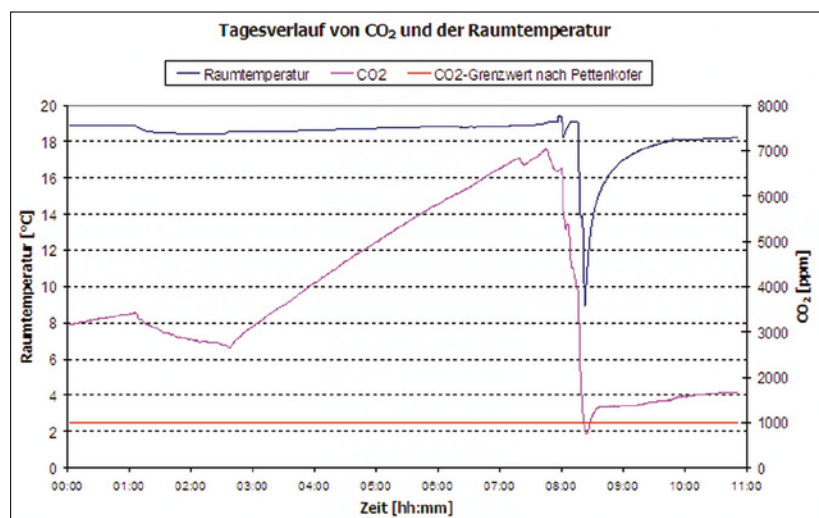
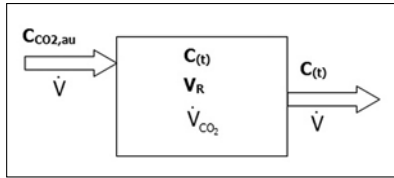


Bild 4: Verlauf der Raumlufttemperatur und des CO_2 -Gehalts im Betrieb ohne Lüftung.

Bild 5:
Massenbilanz
für Kohlen-
dioxid.



CO₂-Gehalts wie etwa von 05.00 bis 05.30 Uhr können durch das Öffnen von Türen entstehen.

Weiters ist in Bild 2 der Verlauf der relativen Raumluftfeuchte ersichtlich. Mit Hilfe der Lüftungsanlage kann die relative Feuchte in einem Bereich 45–48% relative Feuchte gehalten werden und somit sind auch hier die Kriterien für eine behagliche Raumluft erfüllt.

Messungen: Elternschlafzimmer ohne Lüftungsbetrieb

Um zu veranschaulichen, wie der Verlauf des CO₂-Gehalts ohne Lüftungsbetrieb aussieht, wurde die Lüftungsanlage

abgeschaltet. In Bild 3 ist der Verlauf der relativen Feuchte und des CO₂-Gehalts dargestellt. Der CO₂-Gehalt steigt innerhalb von rund 5 Stunden von 2.800 ppm um 03.00 Uhr auf 7.000 ppm um 08.00 Uhr. Um 08.00 Uhr wurde ein Fenster zur Stoßlüftung geöffnet. Dadurch konnte der CO₂-Gehalt der Raumluft kurzfristig unter dem Grenzwert nach Pettenkofer reduziert werden. Ebenfalls ist in dieser Abbildung eine Öffnung der Tür um 01.00 Uhr ersichtlich, welche wiederum eine leichte Reduzierung des Schadstoffwertes zur Folge hatte. Sehr deutlich ist auch der Frischluft-eintrag durch die Stoßlüftung über die relative Feuchte zu erkennen. Da die Außenluft eine geringere relative Feuchte aufweist wie die im Raum befindliche Luft, kam es um ca. 08.00 Uhr auch zu einem Abfall der relativen Raumluftfeuchte von 87% auf 50%. Dies spiegelt den Zusammenhang zwischen

Frischlufteintrag, CO₂-Gehalt und relative Raumluftfeuchte wieder. Nach der Stoßlüftung stellte sich wieder eine Raumluftfeuchte von 78% ein. Da die Außenlufttemperatur auch wesentlich geringer als die Raumlufttemperatur ist, sinkt auch die Raumlufttemperatur bei einer Stoßlüftung ab. In Bild 4 kann man den Zusammenhang gut erkennen. Nach der Stoßlüftung stellt sich wieder eine Temperatur von 18°C ein.

Validierung

Um die Messungen/Berechnungen auf ihre Übereinstimmung überprüfen zu können, mussten die Luftwechselraten mit den Messwerten verglichen werden. Vom CO₂-Gehalt der Raumluft auf die Luftwechselrate gelangt man mit Hilfe einer Massenbilanz, wie in Bild 5 dargestellt.

Der Luftwechsel ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Kohlendioxidkonzentration der Außenluft C_{CO₂,au}
- Ein- und Austrittsvolumenstrom V-dot
- Raumvolumen V_R
- Kohlendioxidkonzentration zur Zeit t
- Kohlendioxidproduktion einer Person V_{CO₂}

Die zeitabhängige Kohlendioxidkonzentration kann mit folgender Formel dargestellt werden.

Zufuhr + Produktion =
Abfuhr + Speicherung

$$\dot{V} \cdot C_{CO_2,au} + \dot{V}_{CO_2} = \dot{V} \cdot C_{(t)} + V_R \cdot \frac{dC_{(t)}}{dt}$$

V-dot ... Ein- und Austrittsluftvolumenstrom [m³/h]

C_{CO₂,au} ... CO₂-Konzentration der Außenluft [ppm]

Um die Kohlendioxidkonzentration CE nach einer bestimmten Zeit berechnen zu können, erhält man nach Umformen und Lösung der Differentialgleichung:

$$C_E = C_{CO_2,au} + \frac{\dot{V}_{CO_2}}{n \cdot V_R} + \left(C_0 - C_{CO_2,au} - \frac{\dot{V}_{CO_2}}{n \cdot V_R} \right) \cdot e^{-nt}$$

V_{CO₂} ... CO₂-Produktion pro Person [cm³/h]

C_E ... CO₂-Konzentration am Ende des betrachteten Zeitraums [ppm]

C₀ ... CO₂-Konzentration am Beginn des betrachteten Zeitraums [ppm]

t ... Zeit [h]

n ... Luftwechsel [h⁻¹]

V_R ...Raumvolumen [m³]

Simulationen

Für diese Simulationen mussten einige Annahmen getroffen werden.

- Die Innenraumtemperatur wird sowohl im Kinderzimmer Süd, als auch im Elternschlafzimmer konstant mit 20°C angenommen.
- Im Raum befinden sich keine Speichermedien, welche Feuchte oder CO₂ speichern können.

Bild 6: Verlauf des CO₂-Gehaltes – Luftwechsel.

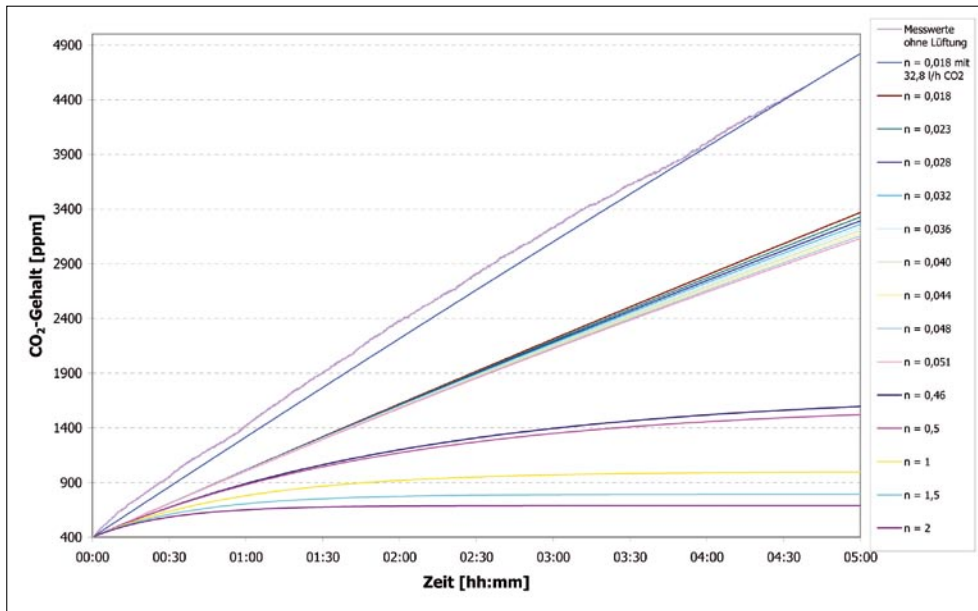
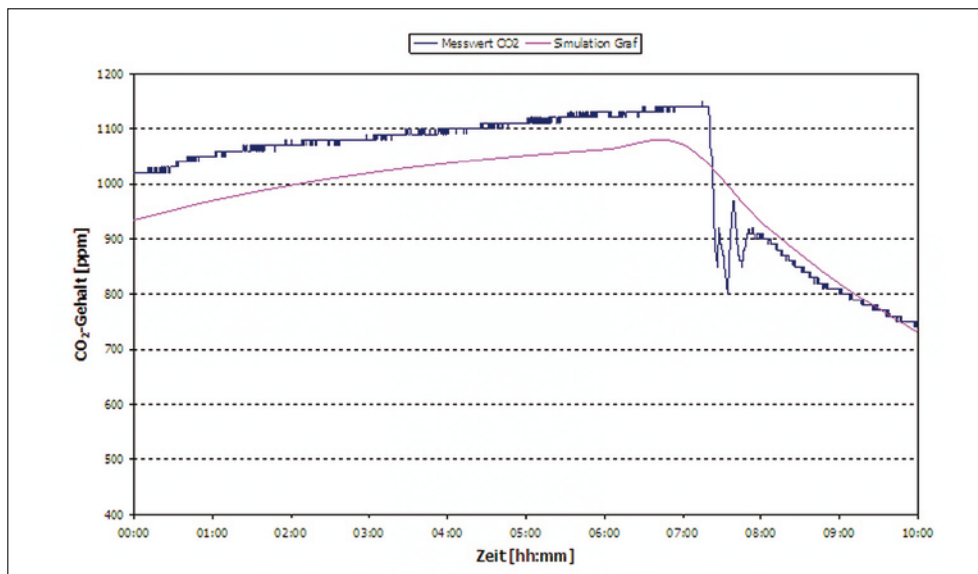


Bild 7: Vergleich des CO₂-Verlaufes der Simulation mit den Messwerten.



Δp [Pa]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n [h^{-1}]	0,018	0,023	0,028	0,032	0,036	0,040	0,044	0,048	0,051

Tabelle 1: Umrechnung von n_{50} auf den Luftwechsel n .

- Die Türen in beiden Räumen sind permanent geschlossen.
- Die Feuchte- bzw. die CO_2 -Produktion bleibt das ganze Jahr Tag für Tag konstant.
- Die Personendaten, betreffend Gewicht, Größe und Alter sind ebenfalls das ganze Jahr als konstant anzusehen.
- Die Personen befinden sich im Ruhezustand.

Für die Berechnung der Werte werden die Daten eines Testreferenzjahres für Wien verwendet. Darin sind die stündlichen Werte für die Lufttemperatur und die relative Feuchte der Außenluft enthalten.

Da beim Blower-Door Test des Passivhauses ein n_{50} -Wert von $0,15 h^{-1}$ gemessen wurde und dieser im Zusammenhang mit dem Luftwechsel n steht, musste der n_{50} -Wert auf den realen Luftwechsel umgerechnet werden.

$$n = n_{50} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{50}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

n_{50} ... Luftwechsel bei einem Überdruck von 50 Pa

Δp_{50} ... Überdruck (50 Pa)

Δp ... Tatsächlicher Überdruck

Da der tatsächliche Überdruck Δp in der Praxis zwischen 2 und 10 Pa variiert, wurde der Luftwechsel über diese Bandbreite berechnet (Tabelle 1). Mit diesen Ergebnissen wurde anschließend der Verlauf des CO_2 -Gehalts berechnet. In Bild 6 ist deutlich ersichtlich, dass mit steigendem Luftwechsel der CO_2 -Gehalt deutlich langsamer zunimmt als mit niedrigeren. Je niedriger der Luftwechsel ist, desto steiler die Steigung der Grafen.

Vergleiche der Simulationsergebnisse mit den Messwerten

Um die Simulationsergebnisse auf deren Plausibilität überprüfen zu können, mussten die Ergebnisse mit den Messdaten verglichen werden. In Bild 7 erkennt man deutlich den leicht ansteigenden Verlauf der zwei Grafen. Der Abklingverlauf ist ebenfalls sehr gut ersichtlich und zeigt in der Tendenz eine gute Übereinstimmung.

Zusammenfassung

Verschiedene CO_2 -Austoßraten verschiedener Altersgruppen, mit unterschiedlichem Geschlecht, bei leichter Arbeit wurden untersucht. Fast alle Berechnungsalgorithmen, mit Ausnahme „Ruch und Patton“ (höhere Werte),

wichen nur gering voneinander ab. Die Berechnungsmethode nach „Harris und Benedict“ liefert für Frauen sehr niedrige Werte.

Bei den Messungen stellte sich heraus, dass im Elternschlafzimmer bei Lüftungsbetrieb, bei einem Luftwechsel von $0,46 h^{-1}$ der CO_2 -Gehalt der Raumluft nie den Grenzwert überschritt. Bei der Messung ohne Lüftungsbetrieb wurden jedoch bis zu 7.000 ppm gemessen. Deswegen müssen in luftdichten Räumen/Häusern unbedingt Lüftungsanlagen installiert werden. Selbst bei niedrigem Luftwechsel von $0,23 h^{-1}$ konnten Grenzwerte nach Pettenkofer und DIN 1946 Teil 2 fast immer eingehalten oder nur geringfügig überschritten werden. Die Messung der relativen Feuchte im Raum ergab, dass diese immer im Behaglichkeitsfeld lag. Meist betrug die relative Feuchte zwischen 40% und 50%. Nur bei der Messung ohne Lüftungsbetrieb betrug sie unbehagliche 80%. ◀

Literatur

- Beisteiner, A.: Using Metabolic Carbon Dioxide to Estimate Ventilation Rates in UK Schools, Diplomarbeit, Pinkafeld (2002)
- BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Bewertung der Innenraumluft: Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, Wien (2006)
- Graf, M.: Passivhaus; Skript zur gleichnamigen Vorlesung SS 2007, Fachhochschulstudiengang Pinkafeld Gebäudetechnik, Pinkafeld (2007)
- ÖNorm H 6038 (Vornorm): Lüftungstechnische Anlagen - Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung, Österreichisches Normungsinstitut, Wien (2002)

Autoren:

Prof. (FH) DI Dr. Michael Graf
DI (FH) Roman Lendway
Prof. (FH) DI Dr. Wilhelm Zapfel

Fachhochschulstudiengänge Burgenland
 Bildung im Herzen Europas

Fachhochschulstudiengänge Burgenland Ges.m.b.H.
 Fachhochschul-Studiengang Gebäudetechnik

Steinamangerstraße 21, A-7423 Pinkafeld
 Tel.: +43(0)3357-45370 Fax: +43(0)3357-45370-1010
 www.fh-burgenland.at office.btm@fh-burgenland.at