

Fachbereich AKTUELL

FBHM-114

Möglichkeiten zur Bewertung der Lüftung anhand der CO₂-Konzentration

Sachgebiet Oberflächentechnik und Schweißen

Stand: 02.11.2020

Am 27. März dieses Jahres hat der Deutsche Bundestag wegen SARS-CoV-2 eine epidemische Lage von nationaler Tragweite festgestellt. Verschiedene Maßnahmen sind seitdem zur Eindämmung der Epidemie initiiert worden. Die hier gegebenen Empfehlungen zur Bewertung der Lüftung beziehen sich nur auf die Zeit während der SARS-CoV-2 Epidemie.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ befasst sich mit der Lüftung von Innenräumen, in denen sich regelmäßig Beschäftigte aufhalten, als einer der Maßnahmen zur Reduzierung des Infektionsrisikos.

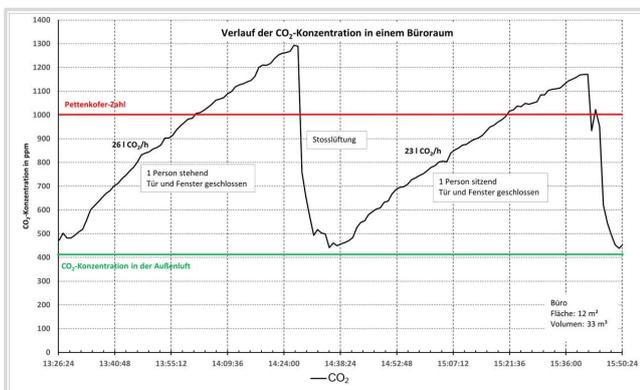


Bild 1: Beispiel für den Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Büroraum (siehe Bild 6)

Bei großen Infektionsausbrüchen können in der Regel folgende Gemeinsamkeiten festgestellt werden:

- Geschlossene Räume
- Viele Menschen
- Schlechte Belüftung

In einigen Fällen kommen auch körperliche Aktivitäten wie schwere Arbeit, Sport oder Singen hinzu.

Die „schlechte“ Belüftung wird meist nicht genauer spezifiziert. Daher ist es zielführend, im Umkehr-

Inhalt

1	Von SARS-CoV-2 unabhängige, aktuelle Regelsetzung.....	2
2	Berechnung der CO ₂ -Konzentrationen	2
3	Beurteilung der Raumbelugung	4
4	Ermittlung der Lüftungsintervalle	4
5	Messung der CO ₂ -Konzentrationen	6
6	Lüftung in großen Werkshallen.....	6
7	Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen	7
	Anlage: Nomogramme zur Bestimmung von Lüftungszyklen	9

schluss, für „gute“ Belüftung zu sorgen. Diese Lüftung dient nur der Reduzierung potenziell belasteter Aerosole. Andere Übertragungswege werden durch die Lüftung nicht beeinflusst.

Die Beurteilung der Qualität einer Lüftung erfolgt in der Regel in Bezug auf die Stoffe, wegen derer gelüftet werden soll oder muss. Das können zum Beispiel Abgase eines Verbrennungsprozesses oder bei einem Fertigungsprozess freigesetzte Gefahrstoffe sein. Ist die Anwesenheit von Menschen der Grund für Lüftung, ist das ausgeatmete Kohlendioxid die für die Beurteilung der Lüftungsqualität bestimmende Größe.

Die ausgeatmete Luft enthält auch Aerosole, die nach aktueller Einschätzung auch aktive Viren enthalten können. Die quantitative Bestimmung dieser Aerosole und die Beurteilung ihres Inhalts ist mit einfachen Mitteln nicht möglich. Daher kann aktuell zur Infektionsprävention nur die Qualität der Lüftung (Raumluft) beurteilt werden. Die von Menschen der Raumluft hinzugefügte Menge an

CO₂ kann als Maß für die Qualität der Lüftung (Raumluf) herangezogen werden.

Weitergehende Informationen zum Einsatz von Lüftungsanlagen in Pandemiezeiten gibt die „Fachbereich AKTUELL“ FBVW-502 „SARS-CoV-2: Empfehlungen zum Lüftungsverhalten an Innenraumarbeitsplätzen“ vom Sachgebiet Innenraumklima des Fachbereichs Verwaltung [1].

1 Von SARS-CoV-2 unabhängige, aktuelle Regelsetzung

Die Arbeitsstättenverordnung [2] fordert:

„In Arbeitsräumen, Sanitär-, Pausen- und Bereitschaftsräumen, Kantinen, Erste-Hilfe-Räumen und Unterkünften muss unter Berücksichtigung des spezifischen Nutzungszwecks, der Arbeitsverfahren, der physischen Belastungen und der Anzahl der Beschäftigten sowie der sonstigen anwesenden Personen während der Nutzungsdauer ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein.“

Dies wird konkretisiert durch die Technische Regel für Arbeitsstätten, ASR A3.6 „Lüftung“ [3]. „Sind die Beschäftigten und sonstigen anwesenden Personen die bestimmende Ursache für Stofflasten im Raum, ist die CO₂-Konzentration ein anerkanntes Maß für die Bewertung der Luftqualität.“ Die ASR A3.6 gibt die nachstehenden Orientierungswerte vor.

CO ₂ -Konzentration [ml/m ³] oder [ppm]	Maßnahmen
< 1000	<ul style="list-style-type: none"> Keine weiteren Maßnahmen erforderlich (sofern durch die Raumnutzung kein Konzentrationsanstieg über 1000 ppm zu erwarten ist)
1000 - 2000	<ul style="list-style-type: none"> Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern. Lüftungsplan aufstellen (z. B. Verantwortlichkeiten festlegen). Lüftungsmaßnahme (z. B. Außenluftvolumenstrom oder Luftwechsel erhöhen).
> 2000	<ul style="list-style-type: none"> weitergehende Maßnahmen erforderlich (z. B. verstärkte Lüftung, Reduzierung der Personenzahl im Raum)

Tabelle 1: CO₂-Konzentrationen in der Raumluf (nach ASR A3.6 Tabelle 1)

2 Berechnung der CO₂-Konzentrationen

Nach Rietschel (Raumklimotechnik, Band 1, Grundlagen, 16. Auflage) [4] ist der CO₂-Ausstoß eines Menschen

$$\dot{V}_{CO_2} = 17 * M \text{ in } \left[\frac{l}{h} \right] \tag{1}$$

mit $M [met]$ bezogener Gesamtenergieumsatz (siehe Tabelle 2)

Der Verlauf der CO₂-Konzentration in einem nicht gelüfteten Raum berechnet sich zu

$$c_{CO_2}(t) = c_{START} + \frac{\dot{V}_{CO_2} * n * t}{V_{Raum}} [ppm] \tag{2}$$

- mit \dot{V}_{CO_2} CO₂-Ausstoß in $\frac{m^3}{h}$
- c_{START} CO₂-Außenluftkonzentration in ppm = 415 ppm = Konzentration zu Beginn der Nutzung
- n Anzahl der dauerhaft anwesenden Personen
- t Zeit in h
- V_{Raum} Raumvolumen in m³

In einem belüfteten Raum stellt sich nach einiger Zeit eine gleichbleibende CO₂-Konzentration ein. Diese „Einschwingzeit“ hängt von der Größe des Raums und der Zahl der anwesenden Personen ab.

Geht man von einer gleichmäßigen Verteilung des CO₂ im Raum aus, wird die CO₂-Konzentration im Raum nur noch von der Anzahl der Personen, deren Aktivitätsgrad (CO₂-Ausstoß) und dem Außenluftvolumenstrom bestimmt.

Der notwendige Außenluftvolumenstrom zum Einhalten einer Ziel-CO₂-Konzentration ergibt sich dann aus

$$c_{CO_2} = c_{ZU} + \frac{\dot{V}_{CO_2} * n}{\dot{V}_{ZU}} \tag{3}$$

- mit \dot{V}_{ZU} Außenluftvolumenstrom in $\frac{m^3}{h}$
- c_{ZU} Außenluftkonzentration in ppm = 415 ppm

zu

$$\dot{V}_{ZU} = \frac{\dot{V}_{CO_2} * n}{c_{CO_2} - c_{ZU}} * 1000 \tag{4}$$

Damit verbleibt die Formel

$$\text{Außenluftvolumenstrom in } \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{CO_2 \text{ Emissionen in } \left[\frac{l}{h} \right] * \text{Anzahl der anwesenden Personen}}{CO_2 \text{ Zielkonzentration } [ppm] - 415 [ppm]} * 1000 [ppm] \tag{5}$$

Aktivität	Bezogener Gesamtenergieumsatz M [met]	CO ₂ -Emission [l/h]	Notwendiger Außenluftvolumenstrom für 1000 ppm ^[1] \dot{V}_{1000} [m ³ /h/Person]
Grundumsatz	0,8	14	23
Entspanntes Sitzen	1,0	17	29
Entspanntes Stehen	1,2	20	35
Leichte, überwiegend sitzende Tätigkeit	1,2	20	35
Stehende Tätigkeit I: Geschäft, Labor, Leichtindustrie	1,6	27	46
Stehende Tätigkeit II: Verkauf, mittelschwere Haus- und Maschinenarbeit	2,0	34	58
Schwerarbeit an Maschinen, Werkstattarbeit	2,8	48	81
Körperlich schwere Arbeit, Sport ^[2]	-	≥ 100	171

[1] Ausgehend von einer Außenluftkonzentration von 415 ppm (Monthly Average Mauna Loa, June 2020, von Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory)

[2] Dieser Wert ist nicht aus Rietschel entnommen.

Tabelle 2: Gesamtenergieumsatz als Funktion der körperlichen Aktivität (in Anlehnung an Rietschel, 2008)

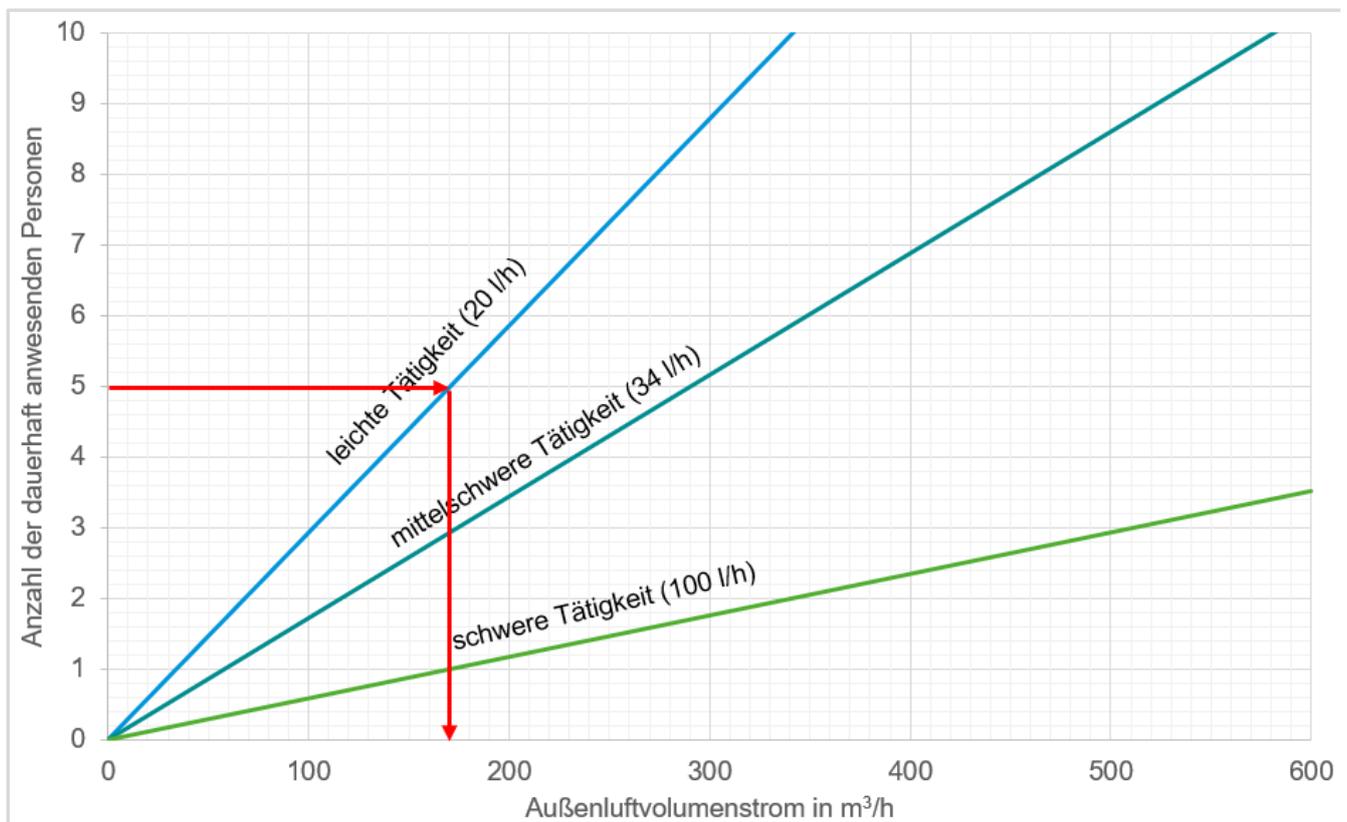


Bild 2: Berechnung des notwendigen Außenluftvolumenstroms zur Einhaltung der Pettenkoferzahl (1000 ppm) in Abhängigkeit von der Personenzahl

In der Tabelle 2 sind die notwendigen Außenluftvolumenströme für die Zielkonzentration 1000 ppm für verschiedene körperliche Aktivitäten ausgewertet.

In der Grafik von Bild 2 ist der notwendige Außenluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Personenzahl und der Aktivität dargestellt.

Ausgewertet wurden die Aktivitäten „leicht“ mit der CO₂-Emission von 20 l/h, „mittelschwer“ mit 34 l/h und „schwer“ mit 100 l/h.

Der Volumenstrom dient zur Einhaltung der Pettenkoferzahl (1000 ppm) im Raum bei einer CO₂-Konzentration in der Außenluft von 415 ppm.

Beispiel:

In einem Raum sind 5 Personen anwesend. Sie üben eine leichte, sitzende Tätigkeit aus. Es wird ein Außenluftvolumenstrom von circa 170 m³/h benötigt, um die Pettenkoferzahl einzuhalten.

3 Beurteilung der Raumbellegung

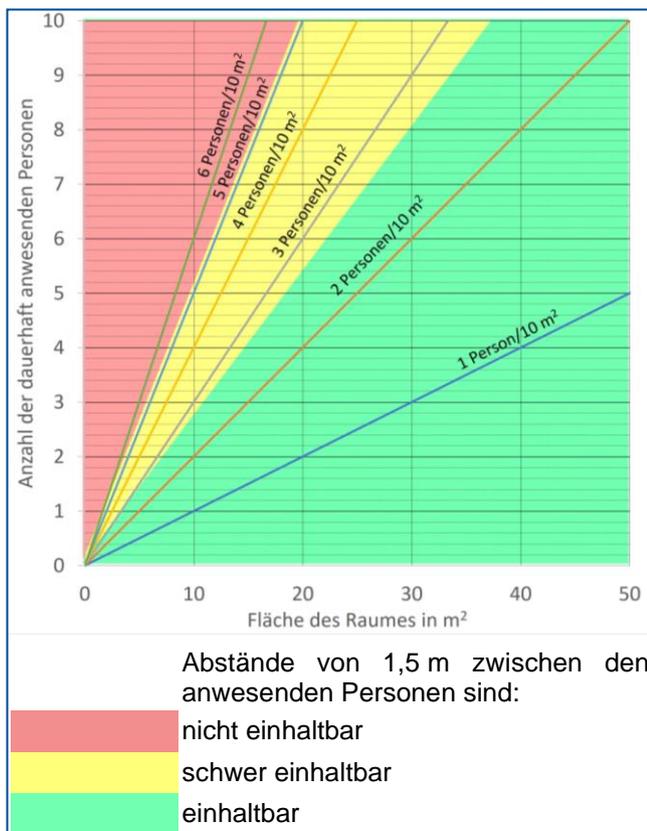


Bild 3: Belegdichte eines Raums

Die Anzahl der im Raum anwesenden Personen bestimmt die Lüftungsrate (Luftwechselrate).

Gleichzeitig wird mit zunehmender Belegung des Raumes auch die Einhaltung notwendiger Abstände zur Vermeidung von Tröpfcheninfektionen schwieriger.

Mit der Grafik in Bild 3 lässt sich grob abschätzen, ob die Raumbellegung in Bezug auf die Abstände als kritisch einzustufen ist.

4 Ermittlung der Lüftungsintervalle

Soll ein Raum über die Fenster und Türen belüftet werden, spricht man von freier Lüftung.

Die Lüftung erfolgt nach Bedarf durch Stoßlüftung. Ohne Lüftung – außerhalb der Lüftungszeiten – steigt die CO₂-Konzentration im Raum kontinuierlich an.

Der Anstieg der CO₂-Konzentration ergibt sich, wie schon in Kapitel 2 erläutert, aus der folgenden, schon bekannten Formel:

$$c_{CO_2}(t) = c_{START} + \frac{\dot{V}_{CO_2} * n * t}{V_{Raum}} [ppm] \quad (2)$$

Damit lässt sich die Zeit zwischen den Lüftungsintervallen leicht nach Formel (6) am Ende dieser Seite berechnen.

Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass bei der Stoßlüftung annähernd die CO₂-Außenluftkonzentration erreicht wird.

Zudem wird davon ausgegangen, dass zwischen den Stoßlüftungen keine Außenluft zugeführt wird.

Weiterhin ist bei der Betrachtung der Raumbellegung der minimale Luftraum pro Person, entsprechend der ASR A1.2 „Raumabmessungen und Bewegungsflächen“ [5], zu berücksichtigen.

Die nachfolgende Grafik ermöglicht die Ermittlung der notwendigen Lüftungsintervalle, um die Pettenkoferzahl (1000 ppm) einzuhalten.

$$Zeit \text{ in min} = \frac{Raumvolumen \text{ in } [m^3]}{Anzahl \text{ der Personen} * CO_2 \text{ Emissionen in } [\frac{l}{h}] * 10^{-3} [\frac{m^3}{l}]} * (CO_2 \text{ Zielkonzentration} - 415) [ppm] * 60 [\frac{min}{h}] \quad (6)$$

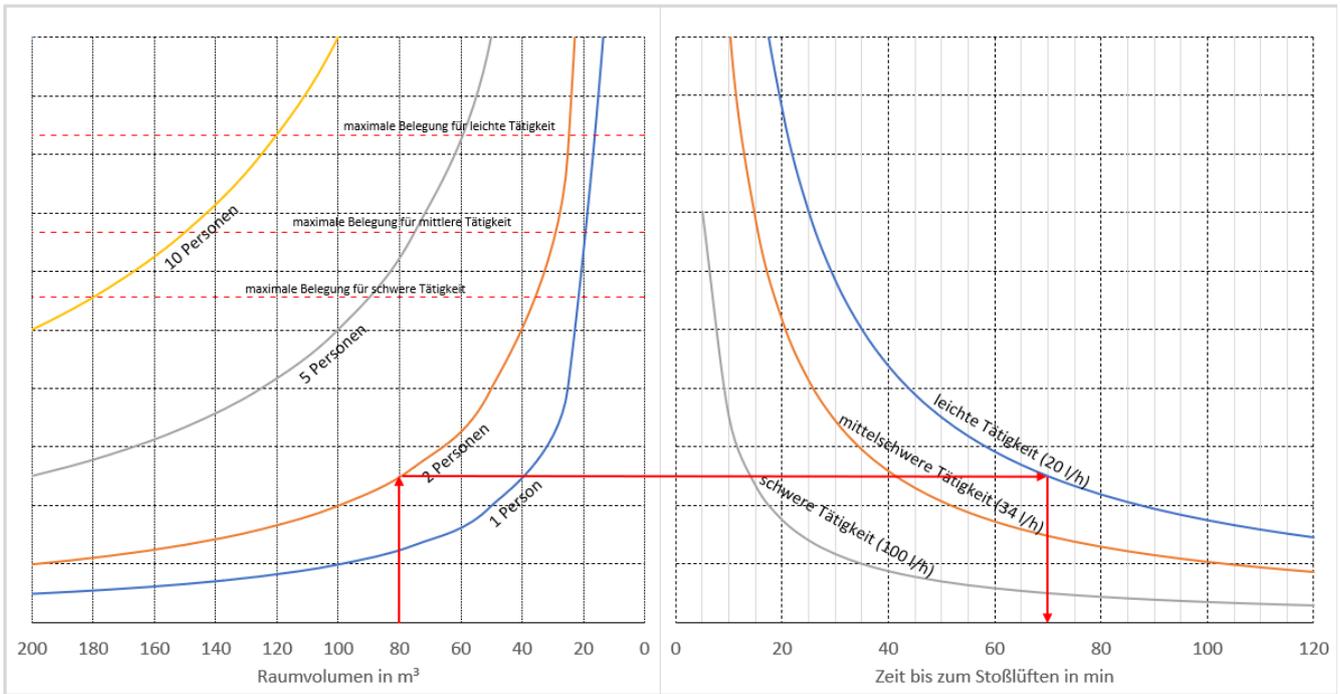


Bild 4: Nomogramm zur Ermittlung der Lüftungsintervalle für kleinere Räume

Beispiel 1 (Bild 4):

2 Personen sitzen in einem Büro mit einem Raumvolumen von 80 m³. Sie gehen dort einer leichten Tätigkeit nach. Das Büro muss dann nach circa 70 Minuten gelüftet werden.

Beispiel 2 (Bild 5):

20 Personen sitzen in einem Besprechungsraum mit einem Raumvolumen von 300 m³. Sie gehen dort einer leichten Tätigkeit nach. Der Besprechungsraum muss nach circa 26 min gelüftet werden.

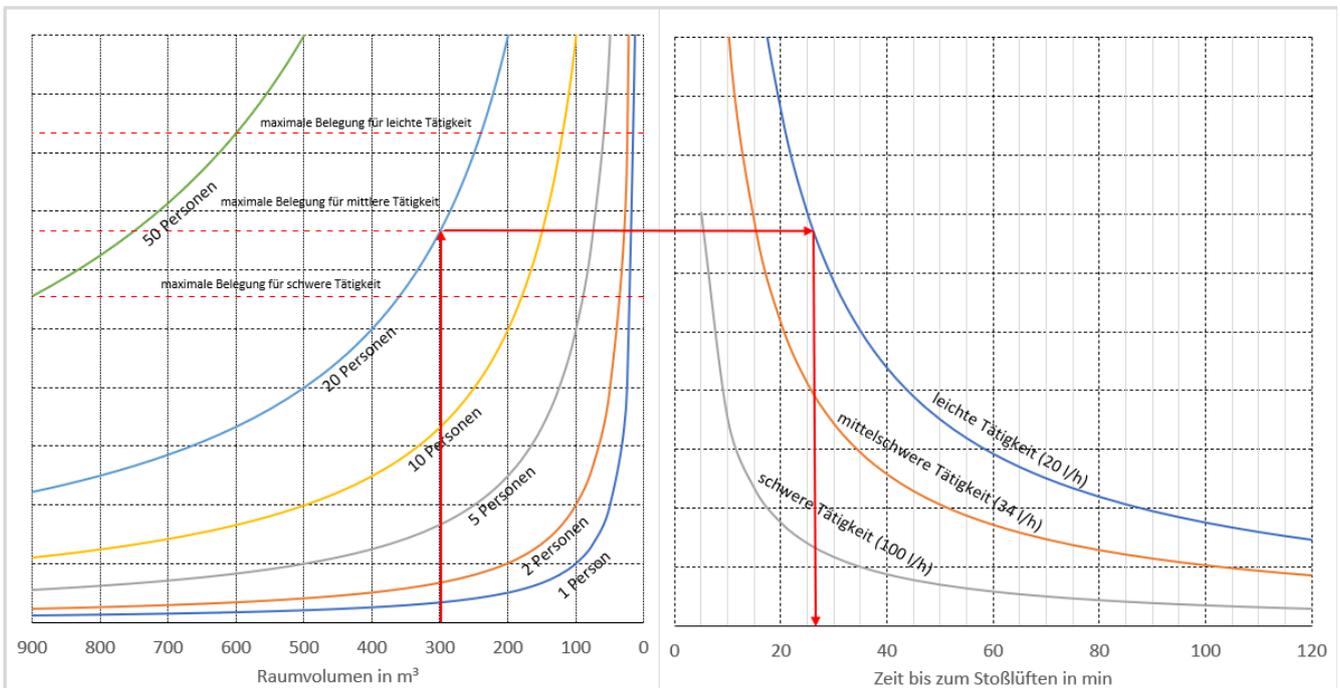


Bild 5: Nomogramm zur Ermittlung der Lüftungsintervalle für größere Räume

Die Anlage dieser „Fachbereich Aktuell“ enthält Blanko-Nomogramme zur individuellen Ermittlung der Lüftungsintervalle.

Die DIN EN 15251 [6] definiert Kategorien zur Klassifizierung des Innenraumklimas. Danach ist die Kategorie II unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass die CO₂-Konzentration im Raum

um maximal 500 ppm über der CO₂-Konzentration in der Außenluft liegt. Diese Kategorie wird empfohlen für ein normales Maß an Erwartungen für neue und renovierte Gebäude.

Die Kategorie I fordert eine CO₂-Konzentration, die maximal 350 ppm über der CO₂-Konzentration in der Außenluft liegt. Diese Kategorie wird empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten. Das sind zum Beispiel Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen.

Nach ASR A3.6 ist die Einhaltung der Kategorie II ausreichend für Arbeitsstätten

(415 ppm + 500 ppm < 1000 ppm).

Der Volumenstrom \dot{V}_{1000} sollte vorrangig in Form von Außenluft eingebracht werden. Die Differenz zu einer niedrigeren Zielkonzentration kann auch durch geeignete Luftreiniger im Umluftbetrieb erbracht werden, wenn sie in der Lage sind, die relevanten Viren abzuscheiden oder zu inaktivieren.

Für den Fall, dass die Beschäftigten die einzige relevante CO₂-Quelle im Raum sind und keine Luftreiniger verwendet werden, kann eine einfache CO₂-Messung (während die Beschäftigten anwesend sind) zur Beurteilung der Lüftung ausreichen. Andernfalls sind die Luftvolumenströme (von außen und durch Luftreiniger) zu bestimmen.

Die empfohlenen Luftvolumenströme können die Anreicherung von Aerosolen in Räumen maßgeblich reduzieren und damit das dadurch hervorgerufene Infektionsrisiko vermindern.

Davon unabhängig gibt es noch das Infektionsrisiko durch Tröpfcheninfektion auf kurze Distanzen. Soweit arbeitsbedingt die Abstandsregel nicht eingehalten werden kann und technische Maßnahmen wie Abtrennungen zwischen den Arbeitsplätzen oder organisatorische Maßnahmen nicht umsetzbar sind, müssen die Beschäftigten mindestens Mund-Nase-Bedeckung (MNB) zum gegenseitigen Schutz tragen und die weiteren üblichen Hygienemaßnahmen einhalten.

5 Messung der CO₂-Konzentrationen

Die in dieser „Fachbereich AKTUELL“ vorgestellten Berechnungen beruhen auf idealisierten Verhältnissen. Sie gehen von einer gleichmäßigen Verteilung der Emissionen in den betrachteten Räumen aus.

Zur genaueren Beurteilung der Lüftungssituation können CO₂-Messungen herangezogen werden.

In dem nachstehenden Beispiel (Bild 6) wurde mit einem CO₂-Messgerät mit Aufzeichnungsfunktion über mehrere Stunden die Belastung eines Büros aufgezeichnet.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die CO₂-Konzentration kontinuierlich ansteigt, bis die Stoßlüftung erfolgt. Auch der Einfluss des Aktivitätsgrads ist erkennbar.

Aus der Messung können die notwendigen Lüftungsintervalle zur Einhaltung der gewünschten CO₂-Konzentration festgelegt werden. Ohne weitere Messungen können diese bei gleichbleibenden Randbedingungen beibehalten werden. Dafür sind CO₂-Messgeräte mit Aufzeichnungsfunktion (Loggingfunktion) erforderlich.

Alternativ können auch sogenannte CO₂-Ampeln eingesetzt werden. Sie zeigen die CO₂-Konzentrationsbereiche mit Farben an. Grün bedeutet in der Regel, dass die 1000 ppm unterschritten sind. Gelb signalisiert die Überschreitung der 1000 ppm und Rot die Überschreitung von 1500 ppm oder 2000 ppm. Mit diesen Geräten ist leicht erkennbar, wann gelüftet werden muss.

6 Lüftung in großen Werkshallen

In Werkshallen ist die Anzahl der dauerhaft anwesenden Personen üblicherweise gering im Verhältnis zum Volumen der Halle. Ein Anstieg der CO₂-Konzentration auf Werte im Bereich der Pettenkofer-Zahl ist in solchen Hallen nicht zu erwarten.

Aber auch in solchen Hallen ist eine ausreichende Außenluftzufuhr sicherzustellen (siehe ASR A3.6). Ist in der Halle keine technische Lüftung vorhanden, erfolgt der Luftaustausch nur über freie Lüftung.

Der natürliche Luftwechsel in solchen Hallen liegt typisch zwischen 0,25/h bei neueren, dichten Hallen und 1/h (und mehr) bei älteren Hallen. Wird ein Außenluftvolumenstrom von mehr als 200 m³/h/Person erreicht, ist das ausreichend (siehe Tabelle 2).

Beispiel: Eine neugebaute Halle hat eine Grundfläche von 20 x 50 m² bei einer Höhe von 5 m. Das Hallenvolumen beträgt dann 5000 m³. Eine Luftwechselrate von 0,25 bedeutet einen mittleren Außenluftvolumenstrom von 1250 m³/h. Das ist für bis zu 6 Personen ohne weitere Maßnahmen ausreichend.

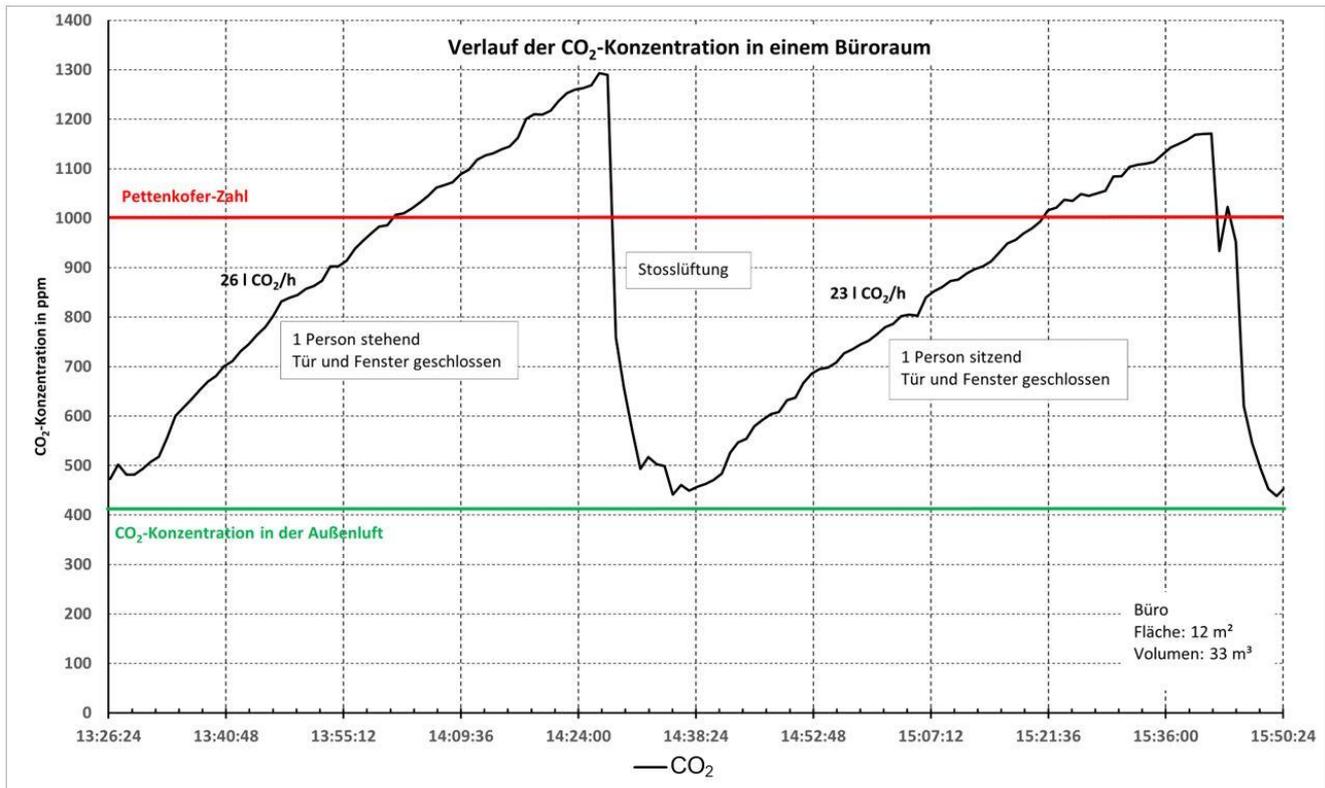


Bild 6: Beispiel für den Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Büroraum

Generell wird empfohlen, mindestens 4 Mal pro Schicht die Halle durch bewusstes Öffnen von Türen, Toren oder Fenstern zu lüften.

Eine Überprüfung der Lüftungssituation ist auch hier mit einer CO₂-Messung möglich. Finden jedoch in der Halle Fertigungsprozesse mit CO₂-Freisetzung statt, ist die Messung nicht mehr sinnvoll. Das gilt zum Beispiel für Verbrennungsprozesse oder Gärprozesse.

Auch wenn durch hinreichende Lüftung eine Gefährdung durch mit Viren belastete Aerosole deutlich reduziert wird, sind in jedem Fall auch die anderen Übertragungswege (Tröpfchen-, Schmierinfektion) zu berücksichtigen.

7 Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen

Raumlüftung kann über die CO₂-Konzentration beurteilt werden, wenn die Emissionen nur von Menschen stammen.

Außenluftvolumenstrom oder Lüftungsintervall können mit den Parametern Personenzahl, Aktivitätsgrad und Raumgröße abgeschätzt werden.

CO₂-Messungen können die Abschätzung besonders in kritischen Situationen unterstützen.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ beruht auf dem durch den Fachbereich Holz und Metall (FBHM), Sachgebiet Oberflächentechnik und Schweißen (SG OS) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zusammengeführten Erfahrungswissen für die Lüftung von Innenräumen.

Die Bestimmungen nach einzelnen Gesetzen und Verordnungen bleiben durch diese „Fachbereich AKTUELL“ unberührt. Die Anforderungen der gesetzlichen Vorschriften gelten uneingeschränkt.

Um vollständige Informationen zu erhalten, ist es erforderlich, die in Frage kommenden Vorschriften einzusehen.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ FBHM-114 ersetzt die gleichnamige Fassung, herausgegeben als Entwurf 09/2020.

Der Fachbereich Holz und Metall setzt sich unter anderem zusammen aus Vertretern und Vertreterinnen der Unfallversicherungsträger, staatlichen Stellen, Sozialpartnern, herstellenden und betreibenden Firmen.

Weitere „Fachbereich AKTUELL“ oder Informationsblätter des Fachbereichs Holz und Metall stehen im Internet zum Download bereit [8].

Literatur:

- [1] „Fachbereich AKTUELL“, FBVW-502 „SARS-CoV-2: Empfehlungen zum Lüftungsverhalten an Innenraumarbeitsplätzen“, Ausgabe 09/2020, Fachbereich Verwaltung, Massaquoipassage 1, 22305 Hamburg (www.dguv.de Webcode: d1181467)
- [2] Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV) vom 12.08.2004 (BGBl. I S. 2179), zuletzt geändert durch Artikel 226 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I s. 1328).
- [3] Technische Regel für Arbeitsstätten, ASR A3.6 „Lüftung“, Ausgabe Januar 2012, zuletzt geändert GMBI 2018, S. 474, BAUA (www.baua.de/asr)
- [4] Rietschel „Raumklimatechnik – Band 1: Grundlagen“, 16. Auflage, ISBN: 978-3-540-54466-1, Springer, VDI-Buch
- [5] Technische Regel für Arbeitsstätten, ASR A1.2 „Raumabmessungen und Bewegungsflächen“, Ausgabe September 2013, zuletzt geändert GMBI 2018, S. 471, BAUA (www.baua.de/asr)
- [6] DIN EN 15251:2012-12 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“, Beuth-Verlag, Berlin
- [7] DIN EN 1822-1:2019-10 „Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) – Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung, Beuth-Verlag, Berlin
- [8] Internet: www.dguv.de/fb-holzundmetall, Publikationen oder www.bghm.de Webcode: <626>

Bildnachweis:

Die in dieser „Fachbereich AKTUELL“ gezeigten Bilder wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von:

Bild 1, 2, 3, 4, 5, 6: FBHM, SG OS, Woyzella

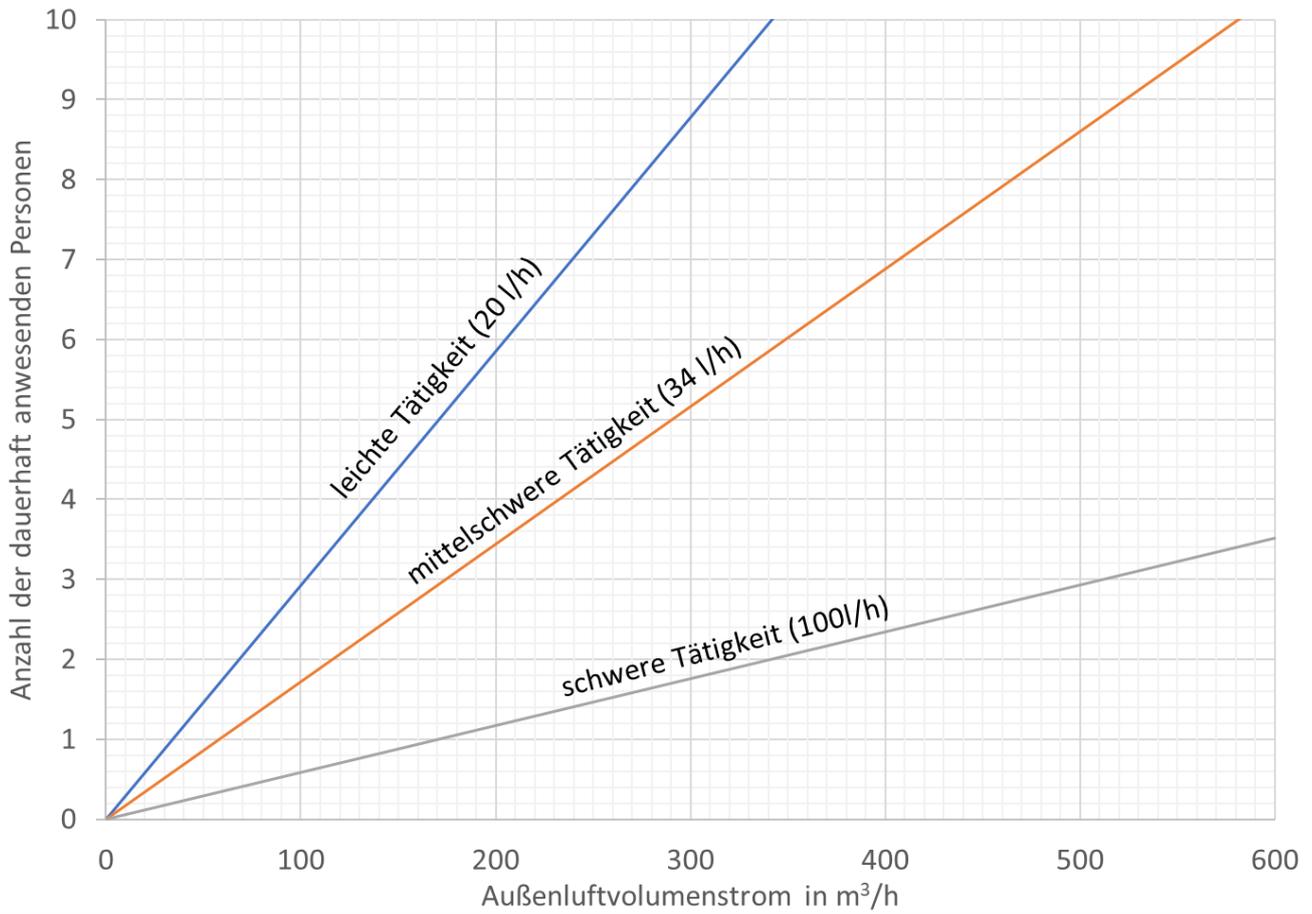
Tabellennachweis:

Tabelle 1: CO₂-Konzentrationen in der Raumluft (nach ASR A3.6 Tabelle 1)

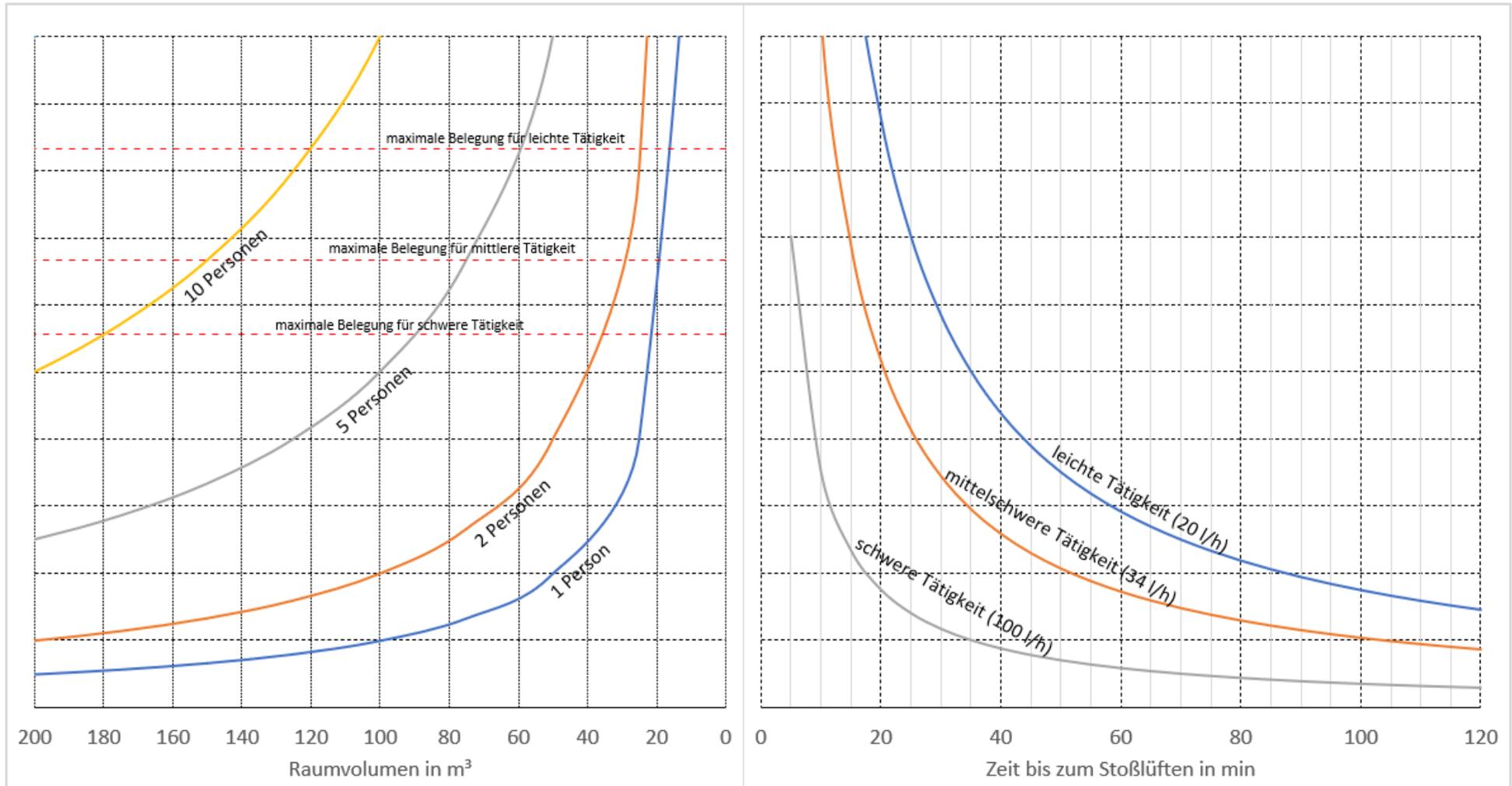
Tabelle 2: Gesamtenergieumsatz als Funktion der körperlichen Aktivität (in Anlehnung an Rietschel, 2008)

Anlage: Nomogramme zur Bestimmung von Lüftungszyklen

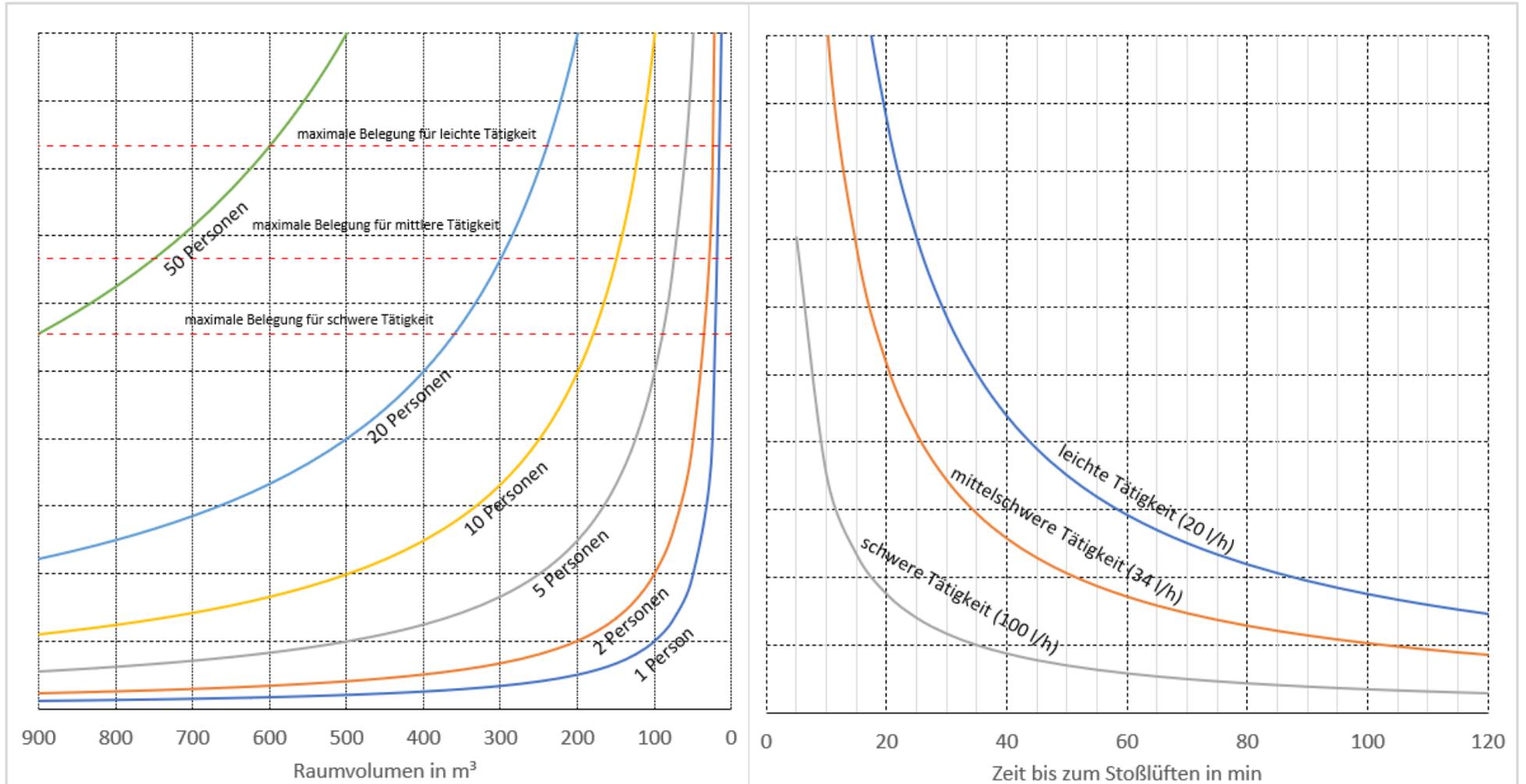
a) Diagramm zur Bestimmung der Außenluftvolumenströme



b) Nomogramm zur Bestimmung der Lüftungszyklen für kleinere Räume



c) Nomogramm zur Bestimmung der Lüftungszyklen für größere Räume



Herausgeber

Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Tel.: 030 13001-0 (Zentrale)
Fax: 030 13001-6132
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Sachgebiet „Oberflächentechnik und Schweißen“
im Fachbereich „Holz und Metall“
der DGUV >www.dguv.de Webcode: d544775