

CO₂ ALS LEITPARAMETER FÜR EINE GUTE LUFTQUALITÄT IN SCHULEN, AUCH IM HINBLICK AUF RADON

E. Hermann

B.P.S. Engineering GmbH

Zusammenfassung

Betrachtet man unter der Spezifik von Schulen und anderen Gebäuden mit hohen Personendichten die CO₂-Konzentration, so werden in der Realität Werte deutlich über dem für gutes Lernen und Arbeiten empfohlenen Bereich von ≤ 1.500 ppm vorgefunden. Unter den Bedingungen der fortschreitenden thermischen Sanierung und den dabei erreichten Luftwechselzahlen sind CO₂-Konzentrationen bis in den Bereich > 10.000 ppm zu erwarten. Der einzige Ausweg besteht in der Erhöhung der Luftwechselzahl zur Außenluft. Mit Simulationsrechnungen werden mehrere Szenarien mit Unterscheidung von Zeiträumen der Nichtnutzung, der Nutzung-Unterricht und der Nutzung-Pausen durchgeführt und diskutiert. Parallel zur Simulation der CO₂-Konzentration wird die Radonkonzentration bei konstanter Quellstärke und variablen Luftwechselzahlen berechnet. Für beide Parameter wird anhand des zeitlichen Verlaufes die Wirkung der unterschiedlichen Quellstärken gezeigt aber als Gemeinsamkeit deutlich die Rolle der Luftwechselzahl herausgearbeitet. Durch die Simulationsrechnungen werden das Potential und die Grenzen von manuellen Lüftungen aufgezeigt. Für Schulen sind Luftwechselzahlen im Bereich von > 4 h⁻¹ erforderlich. Sie können über den erforderlichen Zeitraum nur durch aktive Be- und Entlüftungsanlagen erreicht werden. Mit der Lösung des CO₂-Problems ist in nahezu 100 % der Fälle auch ein potentiell Radonproblem gelöst. CO₂ stellt für Schulen und Räume mit hoher Personendichte einen wichtigen Leitparameter für gute Luftqualität dar.

1. Vorbemerkungen

Die Situation bezüglich der Raumlufthqualität in Räumen mit hoher Personendichte ist dadurch geprägt, dass die CO₂ Freisetzung durch die Atmung der anwesenden Personen eine besondere Rolle spielt und die damit verbundene Raumlufthkonzentration sehr schnell Werte im Bereich von 1.500 ppm bis 10.000 ppm erreichen kann. Räume mit hohen Raumdichten sind beispielsweise zu finden in

- Krippen/Kindergärten
- Schulen, Schulungseinrichtungen, Universitäten
- Krankenhäuser
- Kinos, Säle für Großveranstaltungen
- usw.

Diese Quelle kann jedoch nicht, wie andere Schadstoffquellen, wie z. B. Radon einfach ausgeschaltet werden. Immer wenn Personen in einem Raum sind, ist diese Quelle präsent. Für die oben genannten Situationen bietet sich die CO₂ Konzentration in der Raumlufth als wichtiger Leitparameter für eine gesunde Luftqualität an. Es wird in den folgenden Abschnitten aufgezeigt, dass die Lösung des CO₂ Problems in den meisten Fällen zu einem gesunden Raumklima bezogen auf alle Parameter und insbesondere auch auf Radon hinausläuft. Aus diesem Grund eignet sich CO₂ für diesen Anwendungsfall besonders gut als Leitparameter, zumal dieser auch gut messtechnisch erfassbar ist.

In den weiteren Kapiteln wird der Begriff Radon als Synonym für Rn-222 verwendet.

2. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Radon und CO₂ als Parameter der Raumluftqualität

Die Gemeinsamkeiten zwischen Radon und CO₂

- Die Konzentration in der Außenluft ist in der Regel geringer als in Räumen
 - CO₂ mit 300-600 ppm;
 - Rn-222 mit ca. 10 Bq/m³ bis 20 Bq/m³
- Es liegt eine starke Kopplung der Innenraumkonzentration beider Parameter mit der Luftwechselzahl vor.
- Rn-222 und CO₂ sind wichtige Parameter für die Raumluftqualität

Die Unterschiede zwischen beiden Parametern liegen in der Quelle begründet und werden bezugnehmend auf die nachfolgenden Ausführungen in der Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Unterschiede zwischen CO₂ und Rn-222 als Raumluftparameter

Parameter	CO ₂	Rn-222
Quelle	• Mensch	• Baugrund, Baustoffe
Quellstärke	<ul style="list-style-type: none"> • An Aufenthalt im Raum gebunden • Anzahl der Personen • Im Klassenzimmer 0 bis 30 Personen • Relativ gut zu prognostizieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht an Aufenthalt gebunden • Abhängig von der Ankopplung an Quellen, Transportbedingungen usw. • Unterliegt zeitlichen Schwankungen • Nur messtechnisch erfassbar
Wirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Sofortige Beeinträchtigung des allgemeinen Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit • Keine Dauerschäden bekannt 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine sofortige Wirkung • Zusätzliche und signifikante Strahlenexposition
Korrelation Konzentration zur Anwesenheit	• Bei Raumnutzung steigend	• Bei Raumnutzung fallend

In den nächsten Abschnitten wird der Schwerpunkt auf CO₂ gelegt und im Rahmen der Modellierung wieder der Bezug zu Rn-222 aufgenommen.

3. CO₂ als Leitparameter der Raumluftqualität

In der Tab. 2 sind typische Konzentrationsbereiche für CO₂ angegeben.

Tab. 2: Übersicht zu typischen Konzentrationsbereichen von CO₂[1]

CO ₂ -Konzentration	Vorkommen bzw. Hygienerelevanz
0,07 – 0,08 Vol % 300 bis 600 ppm	Schwankungsbereich in der Außenluft
0,07 – 0,08 Vol % 700 ppm bis 800 ppm	häufige Konzentrationen in Büro-, Versammlungsräumen und anderen Gemeinschaftseinrichtungen
0,1 – 0,15 Vol % 1.000 ppm bis 1.500 ppm	Bereich hygienischer Empfehlungswerte außerhalb von Gefahrstoffarbeitsplätzen, in Schulräumen während des Unterrichts häufig erreicht und überschritten
0,5 Vol % 5.000 ppm	maximal zulässige Konzentration an Gefahrstoffarbeitsplätzen (MAK-Wert), gelegentliche Überschreitungen in Schulräumen nachgewiesen
1 Vol % 10.000 ppm	selbst bei unzureichender Lüftung in Schulen eher selten, aber Maximalwerte in Schulräumen sogar noch geringfügig darüber
4 – 6 Vol % 40.000 ppm bis 60.000 ppm	an speziellen Arbeitsplätzen wie z.B. in Brunnenschächten, Abwassergruben, Gärkellern, Silos o. ä. möglich
4 Vol % 40.000 ppm	Konzentration der Ausatemluft
> 10 Vol % > 100.000 ppm	Lebensgefahr

Das Problem von CO₂ in der Raumluft kann sehr eindrucksvoll an folgender groben Abschätzung veranschaulicht werden.

Die Einatemluft hat eine Konzentration von 400 ppm, wogegen die Ausatemluft eine Konzentration von 40.000 ppm besitzt. In der Atemluft erfolgt somit eine Anreicherung um den Faktor 100.

Die aktuelle Situation in Schulen kann wie folgt dargestellt werden.

- Deutliche Überschreitung der CO₂-Konzentration von 1.500 ppm in mehr als 90 % der Fälle (Untersuchungen in Niedersachsen)
- Spitzenwerte von mehr als 5.000 ppm vorgefunden (MAK-Wert)
- Weitere energetische Sanierung der Schulen mit Reduzierung der LWZ
- Förderung dieser Entwicklung durch Bewilligung von Fördergeldern ohne Berücksichtigung der Folgen bezüglich Raumluftqualität

Warum hat diese Problematik in Schulen einen besonders hohen Stellenwert?

In Schulen liegt eine sehr hohe Personendichte in einem Raum vor. Das Raumluftvolumen beträgt zwischen 5 m³ und 10 m³ pro Schüler. Vergleicht man die Situation in einem Kinderzimmer, so steht pro Kind ein Volumen von 20 m³ bis 40 m³ zur Verfügung. Die Schüler verbringen einen nicht unwesentlichen Anteil des Tages in den Klassenräumen, so dass für diese ungünstige Situation zusätzlich eine lange Expositionszeit vorliegt.

Während des Aufenthaltes in den Klassenräumen wird ein hohes Maß an geistiger Tätigkeit abverlangt. Hohe CO₂-Konzentrationen führen jedoch zu nachweisbar verminderter Leistungsfähigkeit, was dem Ziel der Schule kontraproduktiv gegenüber steht.

Alternativen zum Schulbesuch bestehen aufgrund der allgemeinen Schulpflicht nicht. Man kann davon ausgehen, dass ein überwiegender Anteil der Schulen dieses Problem bereits besitzen oder in naher Zukunft nach einer Sanierung haben werden.

Um die Tragweite zu veranschaulichen, soll nachfolgende Beispielrechnung durchgeführt werden:

Dazu werden lediglich nur folgende Parameter benötigt:

- Atemrate 0,7 m³/h
- CO₂ Konzentration in der Ausatemluft mit 40.000 ppm
- Zielwert in Schulen für ein gesundes Raumklima 1.500 ppm
- 400 ppm CO₂ in der Frischluft

In der Tab. 3 sind ein Soll-Beispiel und ein Ist-Beispiel ausgeführt.

Tab. 3: Einfache Beispielrechnungen im Soll- und Ist-Vergleich

Parameter	Soll	Ist	Einheit
Atemrate	0,7	0,7	m ³ /h
CO ₂ Ausatemluft	40.000	40.000	ppm Vol
CO ₂ in Frischluft	400	400	ppm Vol
Raumluftkonzentration (im Gleichgewichtszustand)	1.500	23.500	ppm Vol
Frischluftrate	24,5	0,5	m ³ /(h*Schüler)
Anzahl Schüler	25	25	
Mindestvolumen pro Schüler	5	5	m ³ /Schüler
Mindestraumvolumen	125	125	m ³
erforderliche LWZ	4,1	0,1	h ⁻¹

Aus der Tab. 3 ist ersichtlich, dass pro Schüler eine Frischluftrate von ca. 24,5 m³/h erforderlich ist, um das Qualitätsziel für CO₂ zu erreichen. In den letzten vier Zeilen der Tab. 3 werden die dazugehörigen Luftwechselzahlen abgeleitet. In der Beispielrechnung „Ist“ werden die gleichen Parameter benutzt, nur eine für thermisch sanierte Schulräume typische Luftwechselzahl von 0,1 h⁻¹ herangezogen. Die berechneten Raumluftkonzentrationen stellen die Gleichgewichtskonzentrationen, bei denen die Quellstärke gleich der Senke ist, dar. Insbesondere die Raumluftkonzentration für den Ist-Zustand ist aufgrund der Berechnung im Gleichgewichtszustand eine Abschätzung nach oben und wird erst nach mehr als 15 Stunden erreicht.

4. Modellierung der CO₂ Konzentration

Die eben durchgeführte Beispielrechnung zeigt die Brisanz des Themas, zeigt aber auch, dass für weiterführende Aussagen, aus denen auch Entscheidungen abgeleitet werden können, eine detailliertere Betrachtung durchzuführen ist. Dabei sind Aspekte,

- dass die Raumnutzung zu veränderten Luftwechselzahlen führt,
- die Nutzung zusätzlich in Unterricht und Pausenzeiten zu unterteilen sind,
- möglicherweise eine zusätzliche Lüftung vor dem Unterrichtsbeginn und zu weiteren Zeiten vorliegt usw.

zu berücksichtigen. Daraus erwächst die Forderung, die CO₂-Konzentration als zeitabhängige Größe zu betrachten. B.P.S. hat für diese Aufgabenstellung ein Simulationswerkzeug entwickelt. Die nachfolgenden Modellierungen basieren auf diesem Programm, das eine beliebige zeitliche Variabilität aller Einflussgrößen ermöglicht. In diesem Zusammenhang wird die Radonkonzentration als weiterer Parameter betrachtet.

Der Schulbetrieb kann durch folgende Parameter beschrieben werden:

- Montag bis Freitag zwischen 7:00 Uhr bis 14:00 Uhr ist Unterrichtszeit.
- Der Unterricht erfolgt über 45 Minuten, anschließend folgt eine Pause von 10 Minuten.
- In Pausen ist die LWZ (LWZ-Pause) höher als in den Stunden oder außerhalb des Unterrichts (LWZ-Ruhe).
- Die Klassenstärke beträgt 25 Personen (incl. Lehrer).
- Das Raumvolumen des Klassenzimmers beträgt 125 m³. Das entspricht einem spezifischen Raumvolumen von 5 m³/Person, das als Minimum für die Bemessung von Klassenräumen gefordert wird.
- Messungen zur Luftwechselzahl in Klassenräumen ergaben einen Bereich von 0,1 h⁻¹ bis 0,3 h⁻¹ bei geschlossenen Fenstern
- Bei geöffneten Fenstern liegt die LWZ zwischen 0,5 h⁻¹ bis 4 h⁻¹
- Für Radon wird eine fiktive konstante Quellstärke angenommen, die bei einer LWZ zwischen dem Raum und der Außenluft von 0,1 h⁻¹ zu einer Gleichgewichtskonzentration von 1.000 Bq/m³ führt.

Im ersten Schritt soll gezeigt werden, welchen Einfluss eine aktive und bewusste Lüftung während der Pausenzeiten auf die CO₂- und Radonkonzentration nimmt. Es wird dabei angenommen, dass die Lüftung nur durch das Öffnen der Fenster und Türen erfolgt. Für den Vergleich des Energieverbrauchs wird eine Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft von 20 K angenommen. Die Simulation erfolgt über den Zeitraum einer Woche, d.h. 7 Tage. Der Unterschied in den verschiedenen Simulationsläufen besteht in der Annahme von unterschiedlichen LWZ während der Pausenzeit. Die Annahmen sind in der Tab. 4 als Szenarien S1 bis S5 dargestellt.

Tab. 4: Parameter für die Szenarien der Simulation

	Szenario				
	S1	S2	S3	S4	S5
LWZ-Ruhe	0,1 h ⁻¹				
LWZ-Pause	0,1 h ⁻¹	0,5 h ⁻¹	1 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹	2 h ⁻¹

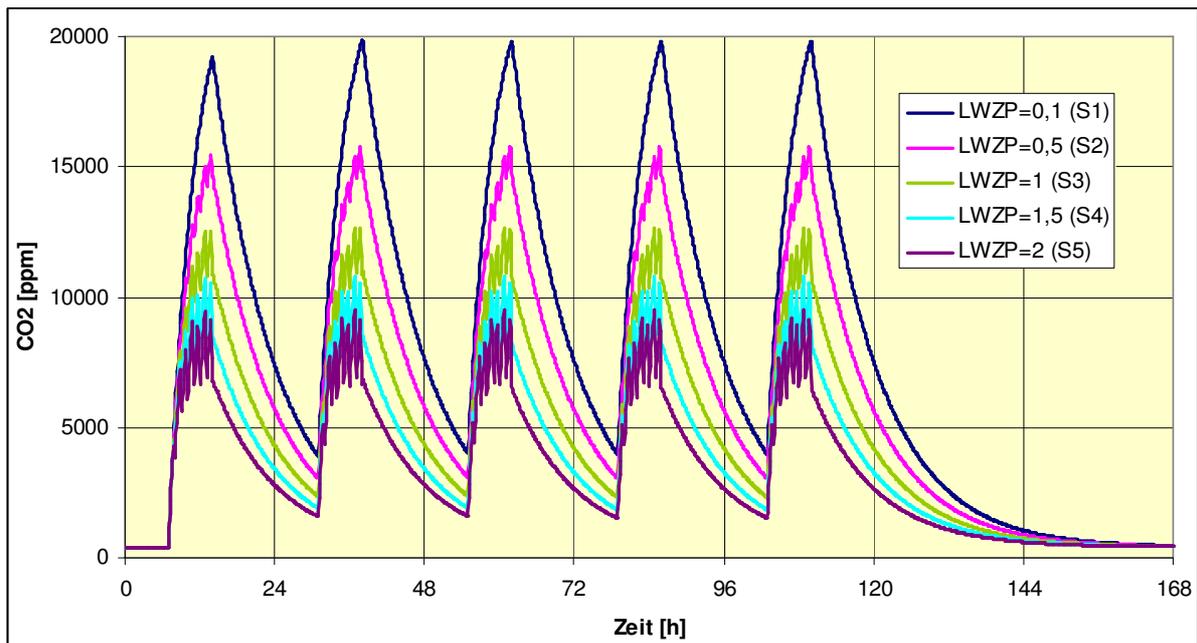


Abb. 1 Darstellung der CO₂-Konzentration in ppm für die Szenarien S1 bis S5 (LWZP=LWZ-Pause in h⁻¹)

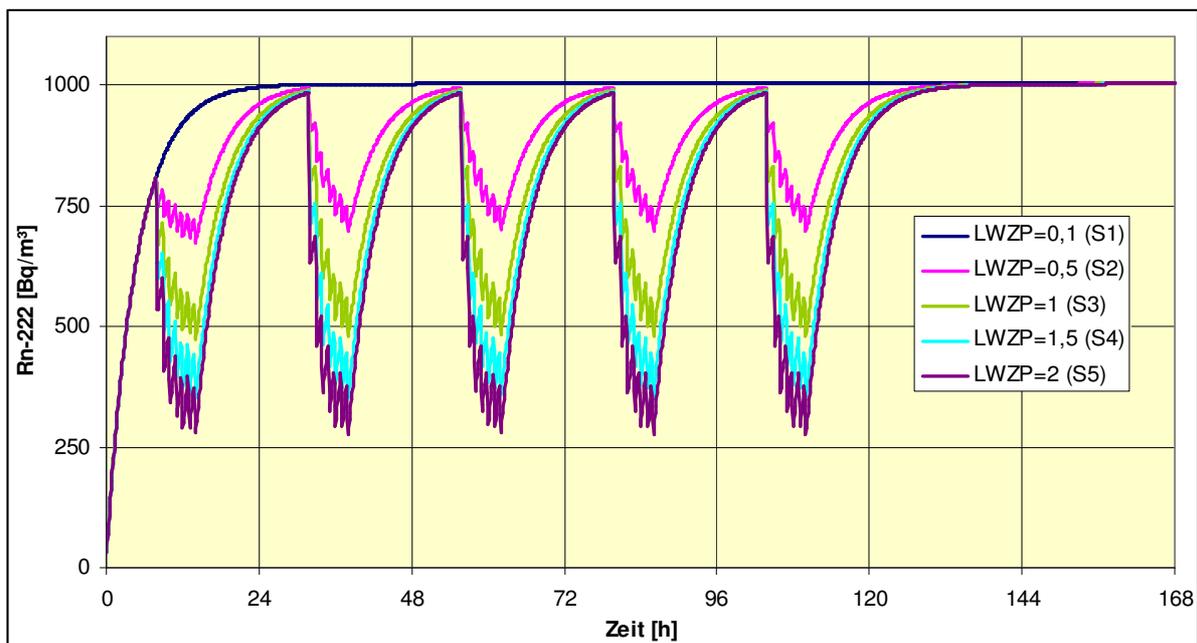


Abb. 2 Darstellung der Radon-Konzentration in Bq/m³ für die Szenarien S1 bis S5 (LWZP=LWZ-Pause in h⁻¹)

In der Abb. 1 sind die zeitlichen Verläufe für die CO₂-Konzentration und in der Abb. 2 die zeitlichen Verläufe für Radon dargestellt.

Das Szenario 1 (LWZP=0,1 h⁻¹) zeigt den zeitlichen Verlauf beider Parameter für den Fall, dass während der gesamten Wochen die LWZ=0,1 h⁻¹ beträgt.

- Für CO₂ steigt die Konzentration bei Unterrichtsbeginn, d.h. wenn Personen anwesend sind, von Werten im Bereich 400 ppm auf Maximalwerte von ca. 20.000 ppm. Ist der Unterricht beendet, verlassen die Personen den Raum, die Quelle entfällt und die CO₂-Konzentration sinkt aufgrund des Luftwechsels mit der Außenluft ab.

- Der Verlauf für Radon unterscheidet sich vom Verlauf von CO_2 . In der Simulation wurde angenommen, dass zu Wochenbeginn die Radonkonzentration im Raum gleich der Außenluft ist. Man sieht, dass die Radonkonzentration mit Anwesenheit der Quelle, also sofort nach Beginn der Woche ansteigt und nach ca. 1 Tag die Gleichgewichtskonzentration von 1.000 Bq/m^3 erreicht. Die Radonquelle ist unabhängig von der Anwesenheit der Personen. Ein typisches Absinken der Radonkonzentration infolge der Nutzung kann in Kurve 1 noch nicht vorliegen, das die LWZ laut Tab. 4 auch bei der Nutzung $0,1 \text{ h}^{-1}$ beträgt.

Die Szenarien 2 bis 5 zeigen den zeitlichen Verlauf beider Parameter für die Situation, in der während der Pausenzeiten die LWZ höher ist als in den Ruhezeiten und diese von $0,5 \text{ h}^{-1}$ bis 2 h^{-1} ansteigt.

- Für CO_2 steigt die Konzentration ebenfalls bei Unterrichtsbeginn von Werten im Bereich 400 ppm auf Maximalwerte, die von der LWZ in den Pausen abhängig sind und zwischen 10.000 ppm und 15.000 ppm liegen. Ist der Unterricht beendet, verlassen die Personen den Raum, die Quelle entfällt und die CO_2 -Konzentration sinkt aufgrund des Luftwechsels mit der Außenluft ab.
- Der Verlauf für Radon unterscheidet sich auch in den Kurven 2 bis 5 vom Verlauf von CO_2 . Es ist ersichtlich, dass die Radonkonzentration im Gegensatz zur CO_2 -Konzentration bei Anwesenheit der Personen sinkt, wogegen die CO_2 -Konzentration bei Anwesenheit steigt. Die Ursache dafür liegt in den unterschiedlichen Quellen. Bereits in der Tab. 1 wurde darauf verwiesen, dass für CO_2 der Mensch die Quelle darstellt, wogegen für Radon der Bauuntergrund, das Gebäude usw. die Ursache ist. Als Gemeinsamkeit beider Verläufe kann jedoch festgestellt werden, dass je höher die LWZ in den Pausen ist, beide Konzentrationen während der Nutzung um so stärker sinken.

In Abb. 3 sind die zeitlichen Verläufe der CO_2 - und der Radonkonzentration für den Simulationslauf Szenario 5 gegenübergestellt. In diesem Vergleich können die Auswirkungen der unterschiedlichen Quellen nochmals veranschaulicht werden.

In der Abb. 4 sind die kumulierten Energieverbräuche für die 5 Szenarien gegenübergestellt. Zwischen Szenario 1 und 5 verdoppelt sich der Energieverbrauch von ca. 15 kWh auf 30 kWh infolge des Luftwechsels bei einem Temperaturunterschied von 20 K zwischen der Außen- und der Raumluft.

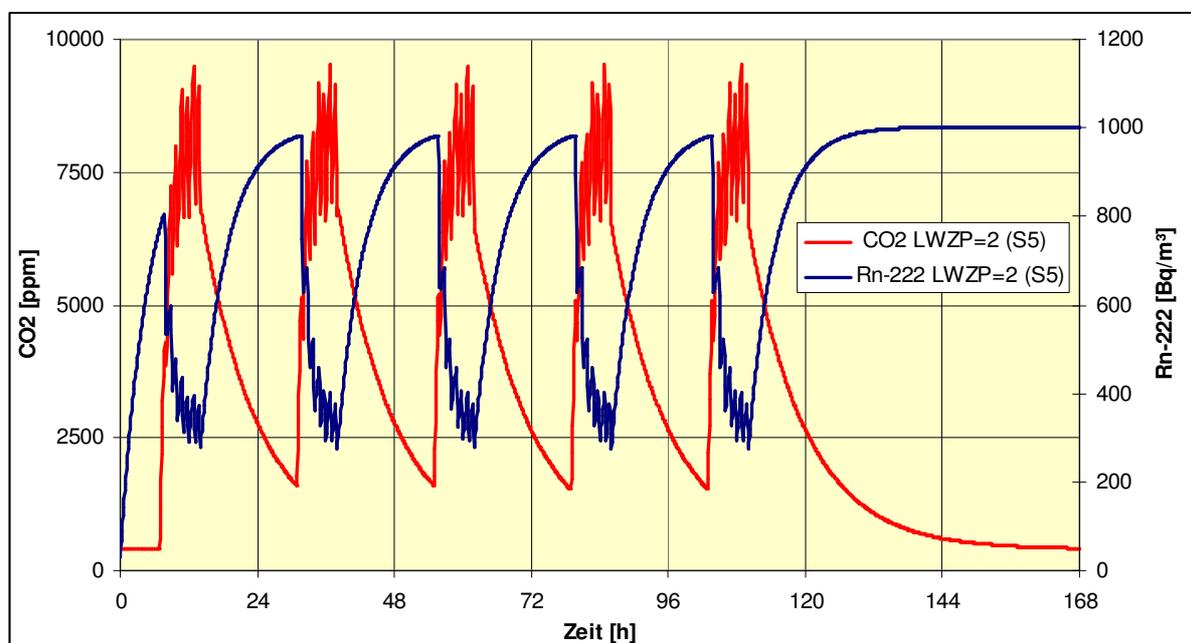


Abb. 3 Gegenüberstellung des Verlaufes der CO_2 und der Radon-Konzentration für das Szenario 5 (LWZP=LWZ-Pause in h^{-1})

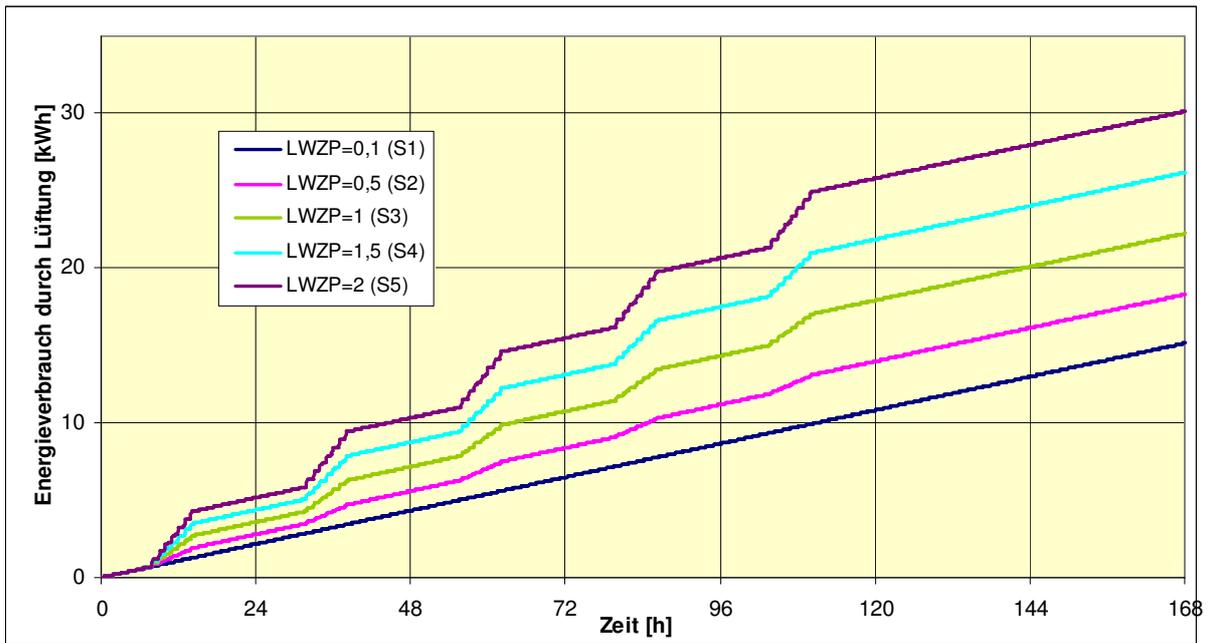


Abb. 4 Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für die 5 unterschiedlichen Simulationsläufe in kWh (LWZP=LWZ-Pause in h⁻¹)

Man kann natürlich eine weitere Verbesserung der Situation für beide Parameter durch die Erhöhung der LWZ-Ruhe erreichen. Aus energetischer Sicht wurde zunächst die LWZ nur während des Unterrichts und der Pausenzeiten auf einen Wert von 4 h⁻¹ erhöht. Während der Zeit außerhalb des Unterrichts wurde wiederum eine LWZ von 0,1 h⁻¹ angenommen (Szenario 6). Die Erhöhung der Luftwechselzahl kann jedoch nur durch eine aktive Be-/Entlüftung erfolgen.

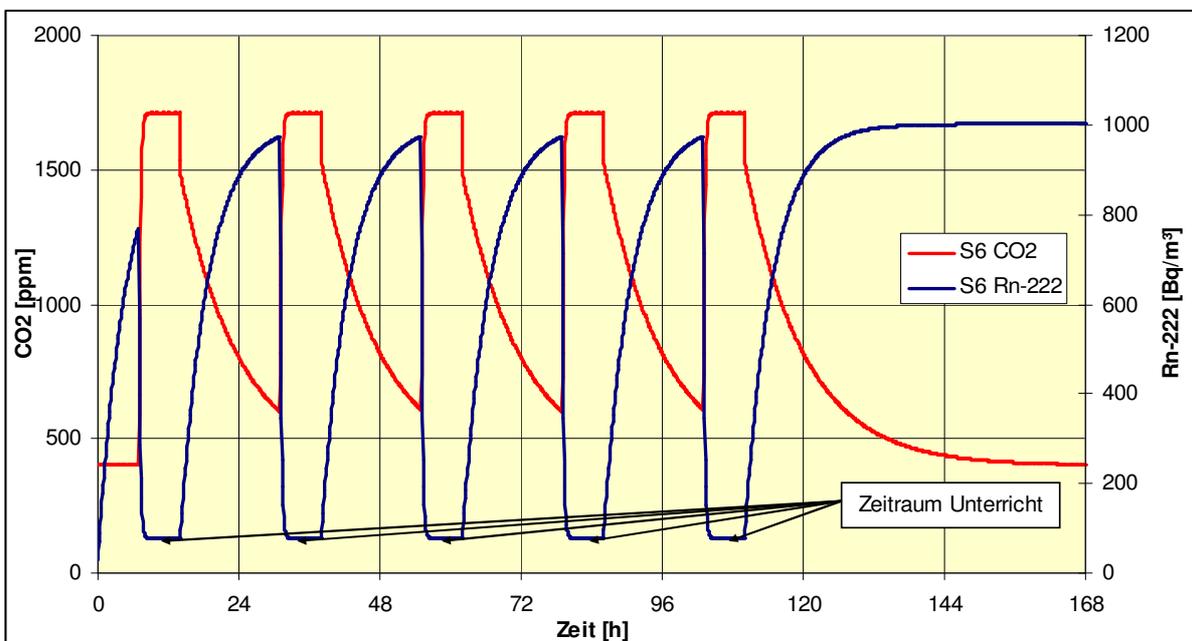


Abb. 5 Gegenüberstellung des Verlaufes der CO₂ und der Radon-Konzentration für das Szenario 6

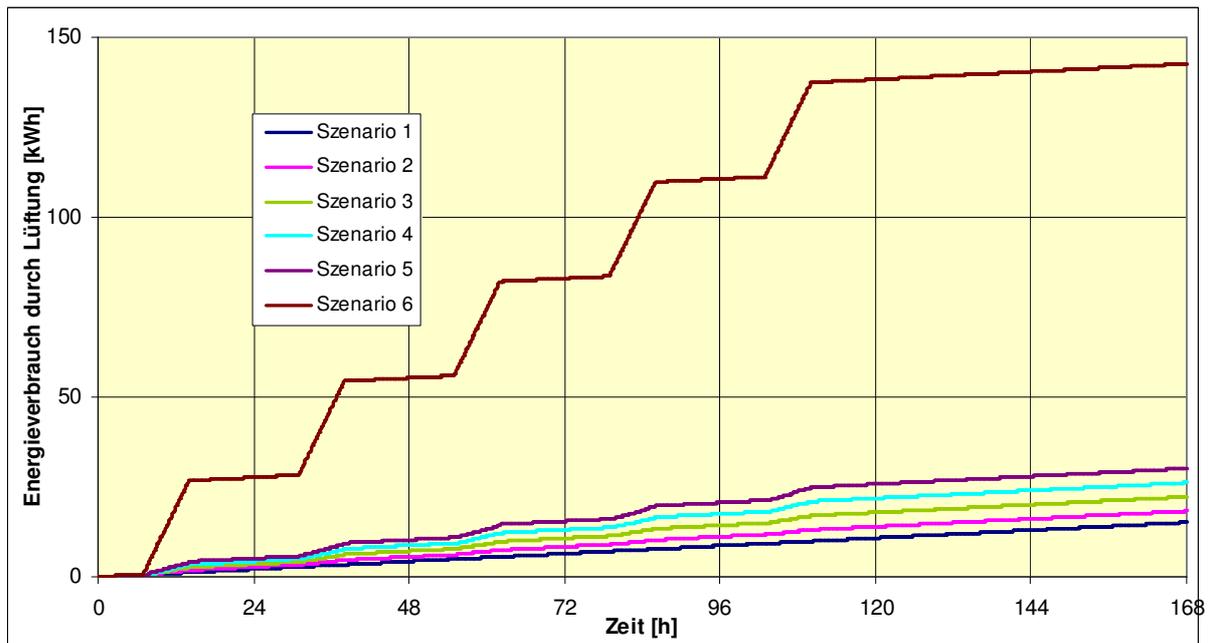


Abb. 6 Energieverbrauch in kWh im Vergleich für alle Szenarien

In der Abb. 5 sieht man deutlich, dass die Zielstellung für CO₂ mit ca. 1.700 ppm schon fast erreicht ist. Gleichzeitig liegen die Radonkonzentrationen während des Unterrichts bei < 100 Bq/m³. Betrachtet man dagegen den damit verbundenen Energieverbrauch (siehe Abb. 6), so liegt man für dieses Szenario bei ca. 140 kWh. Dieser enorme Energieverbrauch widerspricht den Zielen einer energetischen Sanierung. Wenn man jedoch ein gesundes Raumluftklima in Schulen erreichen will und gleichzeitig einen zufrieden stellenden energetischen Zustand anstrebt, geht kein Weg an einer aktiven Be- und Entlüftungsanlagen in Verbindung mit Wärmerückgewinnung vorbei. Auch für diese Aufgabenstellung stellt die Simulation ein wichtiges Werkzeug zur Optimierung dar.

5. Schlussfolgerungen

1. Das CO₂-Problem liegt an jeder Schule bzw. in Räumen mit hoher Personendichte mehr oder weniger vor.
2. Die Quelle kann nicht beseitigt werden, es sind die Personen, die sich in den Räumen aufhalten.
3. Man kann durch manuelle zusätzliche Lüftungen einen Schritt in Richtung der gewünschten Zielkonzentration von 1.500 ppm gelangen. Zur Darstellung des Potentials und der Grenzen dieser Maßnahmen sind Simulationsrechnungen sehr nützlich.
4. Zur tatsächlichen Lösung des Problems sind Luftwechselzahlen im Bereich von $> 4 \text{ h}^{-1}$ erforderlich. Diese können über den erforderlichen Zeitraum nur durch aktive Be- und Entlüftungsanlagen erreicht werden.
5. Um den damit verbundenen Mehraufwand an Energie drastisch zu senken, sind zusätzlich Wärmerückgewinnungsanlagen erforderlich.
6. Die Realisierung der erforderlichen Luftwechselzahlen in Verbindung mit der Wärmerückgewinnung sind Maßnahmen, die zwingend erforderlich sind und dem Stand der Technik entsprechen.
7. Mit der Lösung des CO₂-Problems ist in nahezu 100 % der Fälle auch ein potentielles Radonproblem gelöst.
8. CO₂ stellt für Schulen und Räume mit hoher Personendichte einen wichtigen Leitparameter für gute Luftqualität dar. Man kann somit in diesen Bereichen auch das oft ungewünschte Thema Radon in den Hintergrund stellen.

6. Quellen und weiterführende Literatur

[1] „Lüftung und lufthygienische Aspekte in Schulen“, Juni 2006, Dr. M. Hopf LUA Chemnitz, http://www.lua.sachsen.de/hm/hyg_ummed/Docs/Lueftung_in_Schulen.pdf

„Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“, Broschüre August 2008, Download unter <http://www.umweltbundesamt.de>

„Schulen – besser Lernen in gesunder Luft“, Faltblatt August 2009, Download unter <http://www.umweltbundesamt.de>