

Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Außenluft

Einfluss der CO₂-Konzentration der Außenluft auf die Lüftung

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liegt heute bei rund 0,042 Prozent beziehungsweise bei 420 ppm. Ende der 1950er-Jahre waren es lediglich 310 ppm.

Die Steigerung von rund einem Drittel erfolgte über die Zeit nicht linear, sondern exponentiell – unstrittig verursacht durch den Menschen.

Bereits im Jahr 2055 wird die CO₂-Konzentration auf rund 520 ppm angewachsen sein, wenn die Menschheit nicht signifikant ihre Verhaltensweise ändert.

TEXT: Christoph Kaup

Die CO₂-Konzentration in der Außenluft steigt seit Jahren deutlich. **Bild 1** zeigt die weltweite Entwicklung ab Ende der 1950er-Jahre bis heute. Auf Basis des Trends in Form eines Polynoms zweiten Grades auf Grundlage der Messungen Mauna Loa, Hawaii (Werte 01/1958 bis 03/2024) ergibt sich eine Prognose von etwa 520 ppm, die bereits Mitte der 2050er-Jahre erreicht werden könnte (**Bild 2**). Diese Prognose basiert auf einer unverändert voranschreitenden industriellen Entwicklung, welche die bisherige Entwicklung unverändert fortführt. Eventuell könnte sich das Tempo der Entwicklung sogar noch erhöhen, wenn Schwellenländer verstärkt fossile Energieträger nutzen. Eine schnelle Abflachung der Entwicklung ist jedenfalls nicht realistisch zu erwarten. Die verschiedenen SSP-Klimaszenarien (Shared Socioeconomic Pathways, dt.: gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade) wurden auch vom IPCC (Intergovernmental Panel on

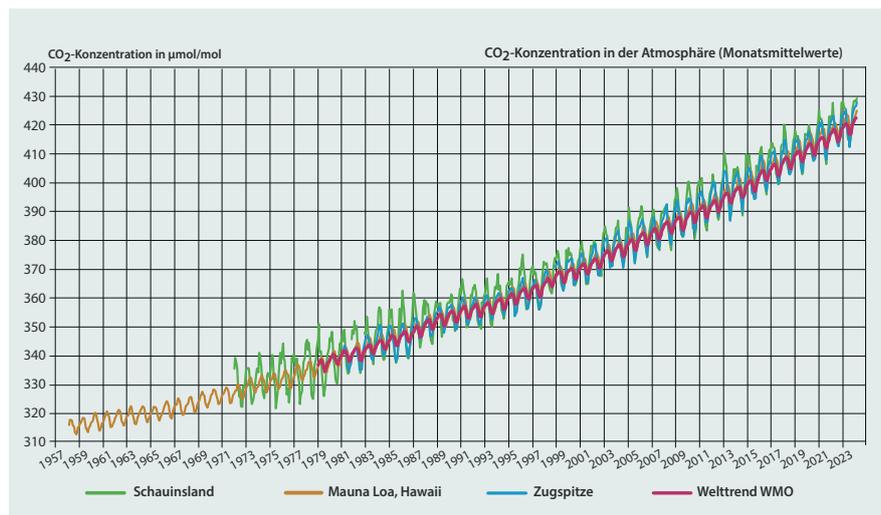


Bild 1: CO₂-Konzentration in der Außenluft. Quelle: Umweltbundesamt, NOAA Global Monitoring Division and Scripps Institution of Oceanography, World Meteorological Organization¹⁾

Climate Change) und dem NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) veröffentlicht²⁾.

Damit wird deutlich, dass die CO₂-Konzentration innerhalb von rund

hundert Jahren von etwa 310 ppm auf 520 ppm steigen kann. Die CO₂-Konzentrationen der Außenluft spielen eine große Rolle für die Auslegung von Raumlufttechnischen Anlagen, da Verunreini-

gungen in Innenräumen durch „frische“ Außenluft verdünnt werden. Allerdings ist die Außenluft immer weniger „frisch“.

Lüftung und CO₂-Konzentration in Innenräumen

Lüftung und vor allem Raumlüfttechnische Anlagen können entscheidend dazu beitragen, die Konzentration an CO₂ in Räumen zu reduzieren. Die notwendige Lüftungsrate (Q_h) ergibt sich aus der DIN EN 16798-1³⁾ mit folgender Beziehung:

$$Q_h = G_h / (C_{h,i} - C_{h,o}) / \epsilon_v$$

mit:

- G_h die Stofflast einer Verunreinigung [l/h]
- C_{h,i} der Richtwert für eine Verunreinigung [ppm]
- C_{h,o} Konzentration in der Zuluft [ppm]
- ε_v Lüftungseffektivität

Die Lüftungseffektivität (ε_v) berechnet sich nach der DIN EN 16798-3⁴⁾ aus:

$$\epsilon_v = (c_E - c_S) / (c_I - c_S)$$

wobei:

- c_E Verunreinigungskonzentration Abluft [ppm]
- c_S Verunreinigungskonzentration Zuluft [ppm]
- c_I Verunreinigungskonzentration Raumluft (Atemzone) [ppm]

Bei idealer Mischlüftung ist ε_v = 1. Bei einer Kurzschlussströmung ist ε_v < 1 und bei einer Quelllüftung ε_v > 1.

Die Stofflast von CO₂ ist abhängig von der Anzahl der Personen und deren Aktivitätsgrad (Atemfrequenz) im Raum.

Verlauf der CO₂-Konzentration mit und ohne RLT

In Bild 3 wird der Effekt der Lüftung verdeutlicht. In diesem Beispiel wird der Effekt eines üblichen Luftwechsels von LW = 3,7 h⁻¹ dargestellt, wobei eine Lüftungseffektivität von ε_v = 1 (Mischlüftung) angenommen wurde (oranger Verlauf). Als Vergleich wird die Entwicklung ohne Lüftung betrachtet (gelber Verlauf, nur Fugenlüftung mit LW = 0,2 h⁻¹). Die

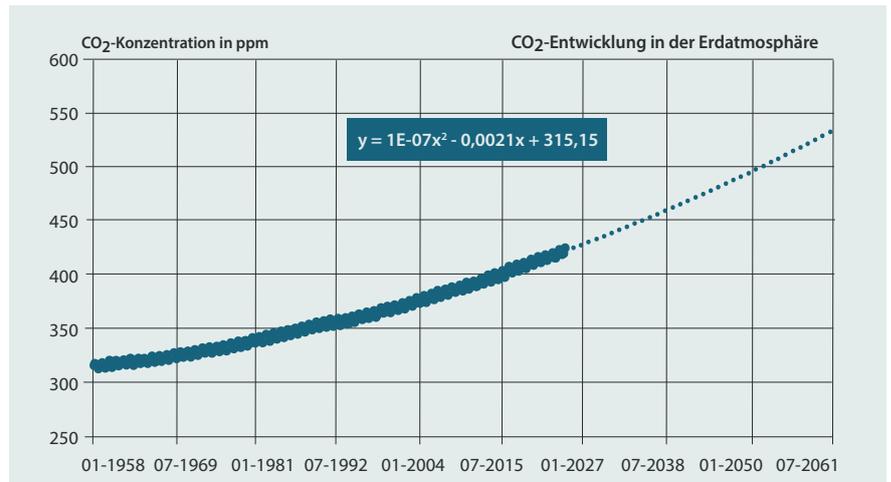


Bild 2: Prognose der CO₂-Konzentration in der Außenluft bis zum Jahr 2061. Grafik: Howatherm

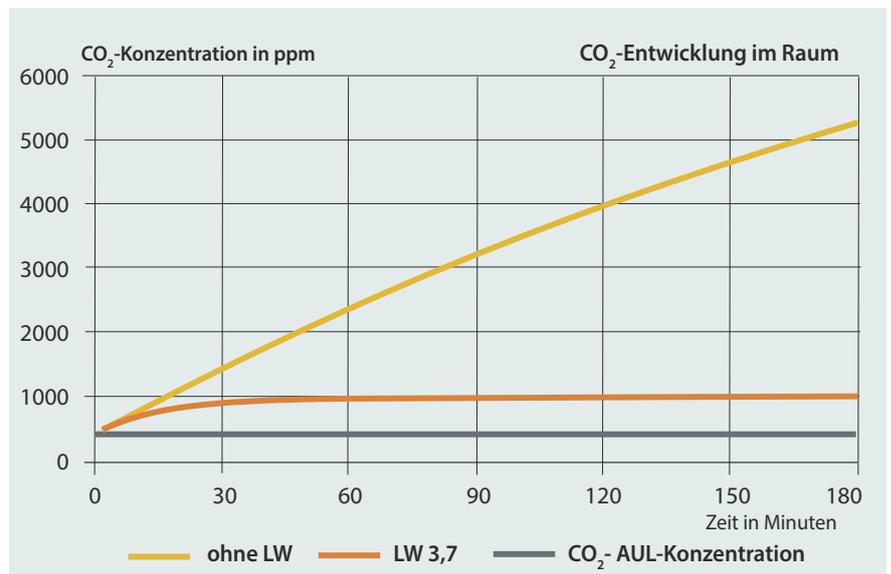


Bild 3: CO₂-Entwicklung in einem Raum von 200 m³ mit und ohne RLT (LW = 3,7 h⁻¹) mit einer AUL-CO₂-Konzentration von aktuell 420 ppm. Grafik: Howatherm

Konzentrationsänderung c(t) ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$c(t) = [c_0 - c_a - q / (n \cdot V)] \cdot e^{-n \cdot t} + q / (n \cdot V) + c_a$$

Falls mit c₀ = c_a, also zum Beispiel die Startkonzentration CO₂ im Raum der Anfangskonzentration (Außenluft- beziehungsweise Zuluftkonzentration) entspricht, folgt:

$$c(t) = -q / (n \cdot V) \cdot e^{-n \cdot t} + q / (n \cdot V) + c_a$$

beziehungsweise umgeformt folgt die Gleichung:

$$c(t) = c_a + q / (n \cdot V) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

F U B N O T E N

- 1) <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid>
- 2) <https://www.climate.gov/media/14617>
- 3) DIN EN 16798-1:2019: Energetische Bewertung von Gebäuden – Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlüftungsqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- 4) DIN EN 16798-3:2017: Energetische Bewertung von Gebäuden, Lüftung von Gebäuden, Teil 3; Lüftung von Nichtwohngebäuden, Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme.

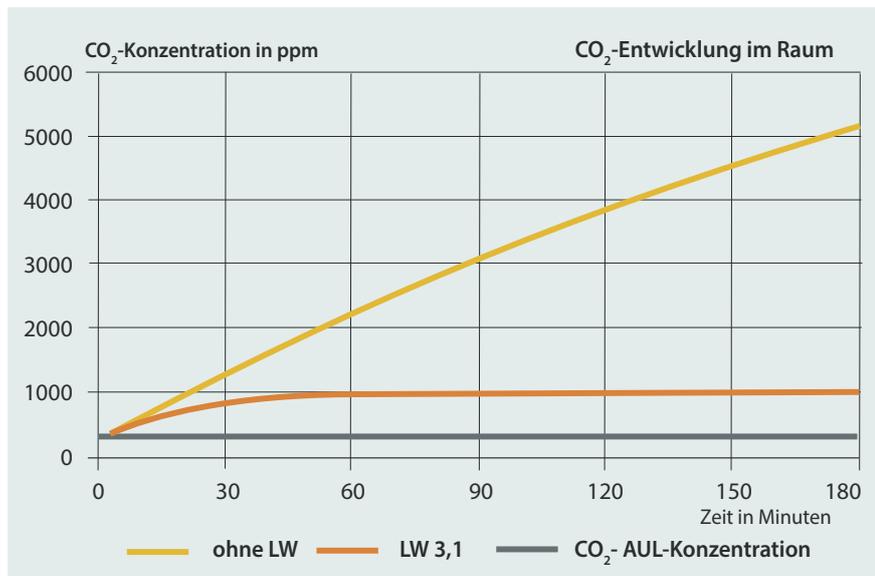


Bild 4: CO₂-Entwicklung in einem Raum von 200 m³ mit und ohne RLT (LW = 3,1 h⁻¹) mit einer AUL-CO₂-Konzentration von 310 ppm Ende der 1950er-Jahre. Grafik: Howatherm

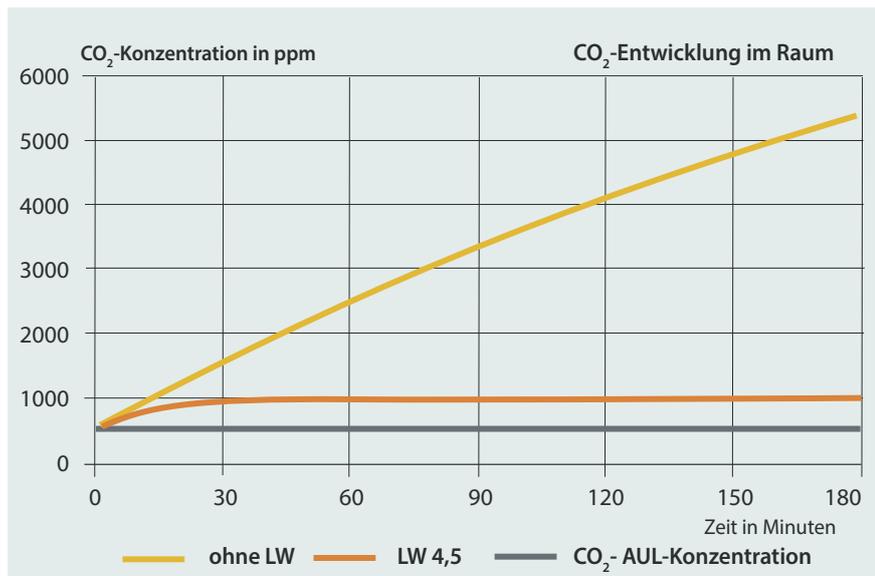


Bild 5: CO₂-Entwicklung in einem Raum von 200 m³ mit und ohne RLT (LW = 4,5 h⁻¹) mit einer voraussichtlichen AUL-CO₂-Konzentration von 520 ppm Mitte der 2050er-Jahre. Grafik: Howatherm

wobei:

- c(t) Konzentrationsverlauf über die Zeit (t) [ppm]
- c₀ Startkonzentration im Raum [ppm]
- c_a Anfangskonzentration (zum Beispiel der Außenluft) [ppm]
- n Luftwechselrate oder Luftreinigungsrate (LW) je h [h⁻¹]
- q Abgabe von CO₂ der Personen [ppm]
- V Raumvolumen [m³]

Menschen verstoffwechseln Sauerstoff zu CO₂ (rund 18 l/h CO₂ in Ruhe). Wären im Beispiel 24 Personen im Raum anwesend, würde sich die dargestellte Situation (Bild 3) zeigen.

Bei einer Anfangskonzentration von heute 420 ppm (Außenluft Grundbelastung) würde sich im Raum ohne Lüftung nach 90 Minuten eine CO₂-Konzentration von rund 3 300 ppm einstellen, während sich mit einer Frischluftfrate von LW = 3,7 h⁻¹ eine CO₂-Konzentration im Gleichgewichtszustand bereits nach etwa

einer Stunde von rund 1 000 ppm ergeben wird.

In diesem Beispiel wird dazu ein Frischluftvolumenstrom von 740 m³/h (200 m³ x 3,7 h⁻¹) bezogen auf 24 Personen und damit eine Frischluftfrate von 30,8 m³/h und Person benötigt.

Aus Bild 3 wird auch deutlich, dass die Atemluft in Innenräumen je nach Lüftungsrate und Aufenthaltszeit meist um den Faktor 2 bis 10 höher belastet ist als die Außenluft. Dies trifft nicht nur auf die CO₂-Konzentration zu, sondern auch auf andere Schadstoffe, wie beispielsweise Partikel (PM_x).

Wäre die Anlage Ende der 1950er-Jahre ausgelegt worden, so wäre eine Luftwechselrate hingegen von LW = 3,1 h⁻¹ ausreichend gewesen, um die CO₂-Konzentration von maximal 1 000 ppm zu gewährleisten (Bild 4). Hätte die Anlage damals jedoch eine Luftwechselrate von LW = 3,7 h⁻¹ gehabt, wäre im Ergebnis die CO₂-Konzentration im Raum auf nur rund 900 ppm gestiegen.

Daraus wird ersichtlich, dass heute bei sonst gleichen Bedingungen eine rund 19 Prozent höhere Luftmenge erforderlich ist, um dasselbe Ergebnis im Raum zu erreichen. Damit werden in erster Näherung auch 19 Prozent höhere Aufwände an Elektro- und Wärmeenergie benötigt.

Leider wird die Situation in der Zukunft höchstwahrscheinlich sogar noch dramatischer. Mitte der 2050er-Jahre wird mit einer AUL-CO₂-Konzentration von etwa 520 ppm eine Luftwechselrate von LW = 4,5 h⁻¹ nötig sein, um 1 000 ppm im Raum zu halten (Bild 5). Die Luftmenge steigt dann gegenüber heute um rund 22 Prozent von 740 m³/h auf 900 m³/h an.

Ende der 1950er-Jahre wäre hingegen ein Außenluftvolumenstrom von nur 620 m³/h nötig gewesen, um die CO₂-Konzentration auf dem gleichen Niveau zu halten. Damit wird letztlich die benötigte Luftmenge innerhalb von rund hundert Jahren um etwa 45 Prozent steigen.

Während dem erhöhten Elektroenergiebedarf durch eine reduzierte Luftgeschwindigkeit entgegengewirkt werden kann, steigen die Wärmeverluste linear zur Luftmenge an.

Wenn der erhöhte Elektroenergiebedarf ausgeglichen werden soll, müsste die Strömungsgeschwindigkeit in den Anlagen bis zur Mitte der 2050er-Jahre sukzessive um rund zwölf Prozent reduziert werden.

Würde die Anlage jedoch weiter mit einer Luftwechselrate von $LW = 3,7 \text{ h}^{-1}$ betrieben werden, würde bei gleicher Belastung die CO_2 -Konzentration im Raum auf rund 1 100 ppm steigen. Bei 3,1-fachem Luftwechsel würde die CO_2 -Konzentration im Raum sogar auf rund 1 200 ppm anwachsen.

Wirkung von CO_2 auf den Menschen

Für den Menschen ist CO_2 in geringer Konzentration nicht toxisch, es behindert aber die Sauerstoffaufnahme. Die CO_2 -Konzentration der Atemluft hat damit einen großen Einfluss auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit des Menschen (Bild 6). Sie sollte nach der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6⁵⁾ bei maximal 1 000 ppm liegen. CO_2 -Konzentrationen über 2 000 ppm führen zu einem Leistungs- und Konzentrationsverlust.

Laut dem Ergebnis eines in österreichischen Schulen durchgeführten Aufmerksamkeits- und Konzentrationstests in Abhängigkeit unterschiedlicher CO_2 -Konzentrationen⁶⁾ sank die kognitive Leistungsfähigkeit bei einem Anstieg der CO_2 -Konzentration von rund 800 ppm auf 3 000 ppm um rund zehn Prozent.

Über 5 000 ppm kann CO_2 zu Kopfschmerzen und Übelkeit führen. Ab 20 000 ppm kommen Schwitzen, Kurzatmigkeit, Herzrasen, Atemnot, Sehstörungen, Zittern und Bewusstseinsstörungen hinzu. Über 50 000 ppm wirkt CO_2 narkotisch und über 80 000 ppm führt CO_2 in 30 bis 60 Minuten zum Tod⁷⁾.

Neben der CO_2 -Konzentration, die wir sogar selbst mit verursachen, und zwar durch die Verstoffwechslung von Zucker und Fett mit Sauerstoff O_2 in unseren Zellen, wirken auch andere Schadstoffe in Räumen auf den Menschen. Die CO_2 -Konzentration wird daher häufig als Surrogat verwendet, um die Belegung der Räume messtechnisch erfassen zu können.

Weitere Schadstoffe wie Feinstäube PM_{10} , Stickstoffoxyde NO_x , Ozon O_3 (Smog) und Schwefeldioxid SO_2 werden durch die Lüftung ebenfalls reduziert und mit der Abluft abtransportiert. Erhöhtes Schwefeldioxid und Ozon – Hauptbestandteile der Luftverschmutzung – können zu einer Verengung der Atemwege in der Lunge führen. Dies hat ebenfalls einen direkten Einfluss auf die körperliche Leistung.

2021 starben alleine in Europa mindestens 253 000 Menschen frühzeitig in

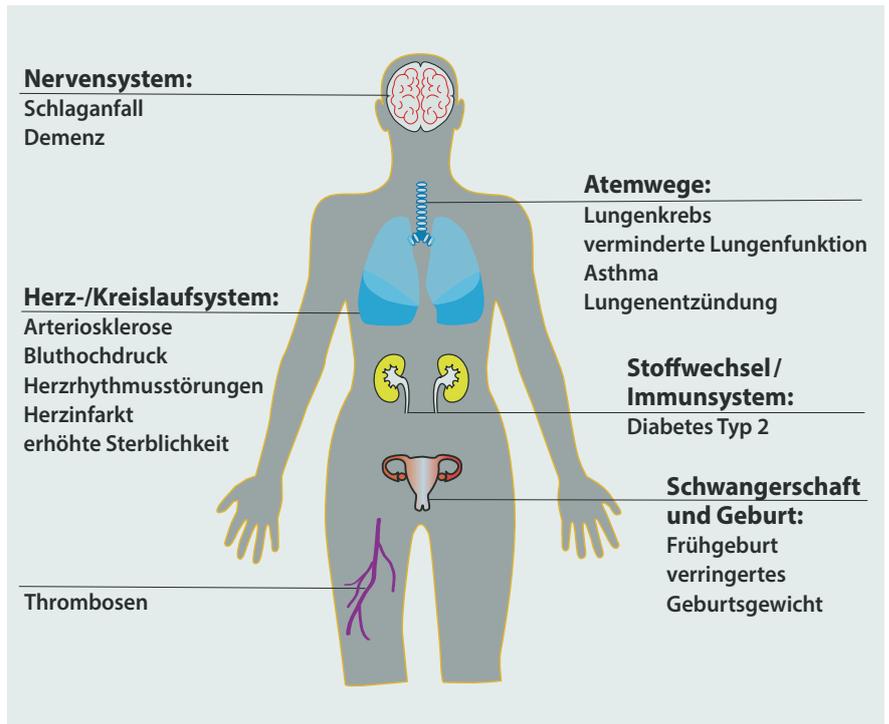


Bild 6: Einfluss von Luftschadstoffen auf die Gesundheit. Grafik: Umweltbundesamt

Folge der Feinstaubkonzentration $\text{PM}_{2,5}$ über dem WHO-Richtwert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Quelle: European Environment Agency). Es gibt auch zunehmend Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Luftverschmutzung und der kognitiven Beeinträchtigung bei Kindern⁸⁾.

Durch die Raumlufttechnik werden neben der CO_2 -Konzentration auch die Konzentration anderer Schadstoffe durch Verdünnungseffekte gesenkt sowie die Abluft abtransportiert. Filter können zudem die Partikelbelastung deutlich reduzieren.

Fazit

Die CO_2 -Konzentration der Außenluft steigt signifikant und sogar exponentiell. Diese Änderung hat einen erheblichen Einfluss auf die Lüftung von Gebäuden. Entweder müssen in den versorgten Räumen höhere CO_2 -Konzentrationen toleriert werden, oder die Luftmengen zur Verdünnung der Innenraumkonzentrationen müssen zwangsläufig steigen.

Dies führt zu einem höheren Energiebedarf und/oder zu teureren Anlagen. Die Strömungsgeschwindigkeiten müssen sinken, die Anforderungen an die Wärmerückgewinnung forciert werden, damit Heiz- und Kühlleistungen nicht noch wei-

ter steigen. Diese werden ohnehin durch den Klimawandel getrieben, da extreme Wetterereignisse leider auch signifikant zunehmen. Oder es muss akzeptiert werden, dass die Effektivität der Lüftung deutlich sinken wird. ■

F U ß N O T E N

- 5) Technische Regeln für Arbeitsstätten: ASR A3.6 Lüftung, Ausgabe Januar 2012.
- 6) Ribic, Werner: Unser Weg, Heft 5, 2007.
- 7) https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/faktenblatt-was-ist-co2.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D2
- 8) APGAR: Air Pollution, Growing brAin and cognitive disordeR in children, doi10.3030/656294



Prof. Dr.-Ing.
Dr. rer. pol.
Christoph Kaup

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier und Geschäftsführer der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.
Foto: Nikola Krieger