

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



**Untersuchung der Permeation
von Kohlenstoffmonoxid durch
komplette Wandaufbauten**

209

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 209

**Untersuchung der Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch komplette
Wandaufbauten**

von

Dr. rer. nat. Sandra Wegner

Dr. rer. nat. Julia Kaufmann

Daniel Butscher

Institut für Brand-und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung -Institut der Feuerwehr -

Heyrothsberge
September 2021

BERICHTS-KENNBLATT

BERICHTSNUMMER: 209		TITEL DES BERICHTES: Untersuchung der Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch komplette Wandaufbauten		ISSN: 0170-0060	
AUTOREN: Dr. rer. nat. Sandra Wegner Dr. rer. nat. Julia Kaufmann Daniel Butscher		DURCHFÜHRENDE INSTITUTION: Institut für Brand-und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Biederitz, OT Heyrothsberge Direktor: i.V. Buchaly			
NUMMER DES AUFTRAGES: 103 (2/2020) IdF		AUFTRAGGEBENDE INSTITUTION: Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V -Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung			
DATUM DES BERICHTES: September 2021					
SEITENZAHL: 70	BILDER: 44	TABELLEN: 9	LITERATURVERWEISE: 28		
KURZFASSUNG: In einer Versuchsanordnung wurde die Permeation von Kohlenstoffmonoxid (CO) durch verschiedene Wandaufbauten untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das toxische Gas CO in der Lage ist, durch alle untersuchten Konstruktionen zu permeieren. Für die Untersuchungen wurde eine konstante CO-Ausgangskonzentration auf einer Seite des Probekörpers sichergestellt, um kontinuierlich die sich aufbauende Konzentration des CO-Permeats auf der anderen Seite des Wandaufbaus mittels FTIR-Spektroskopie über die gesamte Versuchszeit zu erfassen. Die Messwerte wurden grafisch ausgewertet. Als Randbedingung hierfür wurde eine eindimensionale stationäre Diffusion angenommen. Aus den Werten der CO-Konzentrationen erfolgte jeweils die Berechnung einer Massenstromdichte, die hier als CO-Permeationsrate definiert wurde. Die Ergebnisse werden, für die unterschiedlichen Baustoffe, vergleichend gegenübergestellt. Um ein Ranking der untersuchten Materialien zu erstellen, wurden weiterhin Parameter und Daten aus den Messwerten berechnet und zur Bewertung herangezogen (u.a. Diffusionskoeffizient, zeitlich abhängige Konzentrationsanstiege, Durchbruchzeit). Dabei zeigten sich klare Abhängigkeiten des Permeationsprozesses vom Material, dessen Dicke sowie dem anliegenden CO-Konzentrationsgradienten. Insgesamt wird die CO-Permeation, hinsichtlich der Berücksichtigung der toxischen Relevanz bezüglich Zeit und Menge, bei den vorliegenden Baustoffproben als schnell erfolgend bewertet. Darüber hinaus wurden Großversuche durchgeführt, die den realen Fall einer CO-Ausbreitung in einem Wohnhaus beleuchten. Diese Ergebnisse werden den Laborergebnissen gegenübergestellt und diskutiert.					
SCHLAGWÖRTER: Permeation, Diffusion, Baumaterial, Vergiftung, Kohlenstoffmonoxid (CO), Wandaufbauten					

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN.....	III
ZUSAMMENFASSUNG	V
1 AUFGABENSTELLUNG.....	1
1.1 Forschungsauftrag	1
1.2 Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens.....	1
2 METHODIK DER INFORMATIONSGEWINNUNG.....	2
3 AUSGANGSLAGE UND RAHMENBEDINGUNGEN	2
3.1 Allgemeine Lage und Aktuelle Unfälle.....	2
3.2 Permeation.....	4
3.3 Datenlage aus Publikationen	6
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....	7
4.1 Versuchsaufbau	7
4.2 Untersuchte Wandproben	10
4.2.1 Gipskartoneinfachständerwand	11
4.2.2 Holztafelwand	13
4.2.3 Mauerwerk -Kalksandstein	14
4.2.4 Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung	15
4.2.5 Gleitender Deckenanschluss	17
4.2.6 Abdichten der Probekörper	18
4.3 Messergebnisse, verarbeitete Daten und Diskussion der Laborergebnisse	19
4.3.1 Gipskartoneinfachständerwand	19
4.3.2 Modifizierte Gipskartoneinfachständerwände	22
4.3.2.1 Wandfarbe	22
4.3.2.2 Fliesen	24

4.3.2.3	Tapete	27
4.3.2.4	Polystyrolämmungp	28
4.3.3	Holztafelwand	30
4.3.4	Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung	32
4.3.5	Gleitender Deckenanschluss	34
4.3.6	Vergleichende Betrachtung der Laborergebnisse.....	36
4.4	Großversuche.....	40
4.4.1	Versuchsgebäude.....	40
4.4.2	Messkonzept und Messtechnik.....	43
4.4.3	Szenarien.....	46
4.4.3.1	Szenario 1 – Grillabend.....	46
4.4.3.2	Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter	47
4.4.4	Messergebnisse, verarbeitete Daten und Diskussion der Großversuche	48
4.4.4.1	Einflussfaktor Temperatur.....	48
4.4.4.2	Szenario 1 – Grillabend.....	49
4.4.4.3	Szenario 2 -Suizid / Druckgasbehälter	55
4.4.5	Fazit.....	59
4.5	Schlussfolgerung.....	61
5	LITERATUR.....	64
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	67
	TABELLENVERZEICHNIS	70

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

AFKzV	Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung
B	Breite
c	Konzentration
cm	Zentimeter
CO	Kohlenstoffmonoxid
D	Diffusionskoeffizient
EG	Erdgeschoss
ΔQ	CO-Konzentrationsanstieg
Fl	Flur
FL1 / FL2	Probekörper mit Fliesen
FTIR	Fourier-Transformations-Spektrometer/-Spektroskopie
g	Gramm
GK1 / GK2	Gipskarton Probekörper
h	Stunde
H1 / H2	Holztafelwand Probekörper
K	Kelvin
KÜ	Küche
KI	Kinderzimmer
L	Probendicke
l	Liter
M	Molare Masse
MDR	Mitteldeutscher Rundfunk
m³	Kubikmeter
m²	Quadratmeter
min	Minute
mm	Millimeter
mol	Mol
μ	Mikro
Nr.	Nummer
N₂	Stickstoff
OG	Obergeschoss
ppm	Parts per million
PR	Permeationsrate
PS1 / PS2	Polystyrolgedämmte Probekörper
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
R²	Korrelationskoeffizient
s	Sekunde
SZ	Schlafzimmer
t	Zeit
t_b	Durchbruchzeit

T	Temperatur
T1 / T2	Probekörper mit Tapete
V	Versuch
V_p	Volumen Permeatkammer
V_{mol}	Molares Volumen
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
W1 / W2	Probekörper mit Wandfarbe
WO	Wohnzimmer
X1 / X2	Probekörper gleitender Anschluss
Y1 / Y2	Probekörper flächiger Anschluss

ZUSAMMENFASSUNG

Vergiftungsfälle, die sich auf Kohlenmonoxid (CO) zurückführen lassen, rücken immer wieder in den Fokus der Öffentlichkeit. CO ist ein toxisches Gas, welches bei unvollständigen Verbrennungen gebildet wird. Auf Basis früherer Untersuchungen zur CO-Diffusion durch Baustoffe, wurde hier das Permeationsverhalten von CO erweiternd durch verschiedene Wandaufbauten betrachtet. Dabei wurden gängige Innenraumwände sowie Wand-/Deckenanschlüsse berücksichtigt. Mit Hilfe eines speziell konzipierten Versuchsstandes, der möglichst nur die Permeation durch die jeweiligen Wandaufbauten widerspiegelt, wurde die Permeation untersucht und anhand verschiedener Parameter, wie z.B. dem Diffusionskoeffizienten, der Permeationsrate u.a., bewertet. Aus den Daten ließ sich ein Ranking der betrachteten Aufbauten generieren. Die Bewegung und damit auch die Permeation von Gasen, ist isotrop, das heißt, sie findet in alle Richtungen statt, was bei realen Szenarien mit CO-Permeation der Fall ist. Um auch hier Aussagen treffen zu können, werden darüber hinaus Großversuche vorgestellt, die den Sachverhalt unter realen Bedingungen wiedergeben. Dafür wurden in einem leerstehenden Mehrfamilienhaus, bei zwei verschiedenen Szenarien, höhere CO-Konzentrationen gezielt freigesetzt und die Ausbreitung in andere Räume und Etagen erfasst. Die Konzentrationsverläufe werden im Einzelnen betrachtet und die Unterschiede zwischen den Laboruntersuchungen und den Großversuchen eingehend diskutiert. Aus den Ergebnissen werden, unter Berücksichtigung bereits bekannter Erfahrungen, Einsatzhinweise für die Feuerwehren abgeleitet.

1 AUFGABENSTELLUNG

1.1 Forschungsauftrag

Aufgrund des Verwaltungsabkommens der Bundesländer über die Brandschutzforschung vom 26.08.1993 und des durch den AFKzV beschlossenen Forschungsprogramms für das Jahr 2020 erteilte das Ministerium für Inneres, Digitalisierung und Migration Baden-Württemberg im Auftrag der Länder dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung – Institut der Feuerwehr (IdF) den Forschungsauftrag Nr. 103 (IdF – 2/2020) „Untersuchung der Permeation von Kohlenstoffmonoxid (CO) durch komplette Wandaufbauten“.

1.2 Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens

Immer wieder und in den letzten Jahren kam es zunehmend zu Vergiftungsfällen mit CO. Ein Teil der Fälle ist bedingt durch technisches Versagen, z.B. bei defekten Heizgeräten oder geschieht aus Unwissenheit und Unachtsamkeit, z. B. beim unsachgemäßen Umgang mit Kaminen, bei der Verwendung von Grillgeräten oder benzinbetriebenen Arbeitsgeräten in nicht oder schlecht belüfteten Innenräumen. In jüngster Zeit sorgte die zunehmende Zahl von CO-Vergiftungsfällen bei Gästen von Shisha-Bars für Schlagzeilen, weil diese Lokale häufig ohne CO-Warmmelder und Lüftungen betrieben werden. Auch das in suizidaler Absicht bewusste Freisetzen von CO in Innenräumen reiht sich in dieser Auflistung an Vorfällen ein. Unabhängig von der Ursache des Freiwerdens von CO besteht die Gefahr, dass sich das farb-, geruch- und geschmacklose Gas unbemerkt in einer Gebäudestruktur ausbreiten kann und zur toxischen Exposition bzw. Vergiftung dort befindlicher Personen führt. Deshalb sollten Einsatz- und Rettungskräfte CO-Warngeräte tragen. Im Zuge der Diskussion um die Ausbreitungswege von CO in Gebäudekomplexen wurde das IMK-Forschungsprojekt 2/2017 aufgelegt, in dem die Permeation von CO durch verschiedene Baustoffe untersucht und bestätigt werden konnte. Noch unklar ist, wie sich die Ausbreitung von CO durch einen kompletten Wandaufbau, sowohl aus nicht brennbaren Baustoffen, als auch mit nachwachsenden Rohstoffen, darstellt.

Bislang liegen keine Erkenntnisse vor, inwieweit Materialien, die reale Wandaufbauten komplettieren (Wand- und Fugenfüllungen, Putze, Farbanstriche, Tapeten etc.), einen Einfluss auf die CO-Permeation ausüben. Ebenso ist der Einfluss der Strukturen einer kompletten Wand,

wie z.B. Stöße und Mauerfugen, noch unbekannt. Das durchgeführte Forschungsprojekt liefert diesbezüglich gesichertes Datenmaterial.

2 METHODIK DER INFORMATIONSGEWINNUNG

Zur Bearbeitung des Forschungsauftrages gemäß Aufgabenstellung wurde die umfassende Recherche nach themenrelevanten Publikationen sowie Inhalten und Ergebnissen von Tagungen der Publikation des Forschungsthemas „Untersuchung der Diffusion von CO durch Baustoffe“ von Seliger et al. [Seliger et al., 2019] aktualisiert und erweitert. Die Recherche beinhaltete ebenfalls die Suche nach entsprechenden Ereignissen der letzten Jahre sowie deren Auswertung. Teilweise ergab sich bei der Recherche und dem weiteren Vordringen in die Thematik die persönliche Kontaktaufnahme mit den Verfassern der Publikationen.

Die im Folgenden präsentierten Forschungsergebnisse basieren auf Versuchen im Labormaßstab und auf Großversuchen in einem leerstehenden Mehrfamilienhaus.

3 AUSGANGSLAGE UND RAHMENBEDINGUNGEN

3.1 Allgemeine Lage und aktuelle Unfälle

Die Gefahr von CO liegt insbesondere in der Tatsache begründet, dass es für den Menschen nicht wahrnehmbar ist (geruch-, geschmack- und farblos). Anders als bei sehr leichten Gasen, wie z.B. Helium, vermischt sich CO, auf Grund seiner ähnlichen Dichte wie Luft, sehr leicht mit Raumluft. [GESTIS, 2021] Problematisch ist auch die Vielfältigkeit unterschiedlichster Symptome, die durch CO hervorgerufen werden können. Diese können auch anderen Krankheitsbildern zugeordnet werden. Dringt CO in den menschlichen Körper ein, wird das Gas am Hämoglobin, welches für den Sauerstofftransport zuständig ist, gebunden, und das bis zu 200-mal besser als Sauerstoff. Letzterer wird dadurch verdrängt. [Goldstein, 1998] Eine Übersicht der Symptome im Zusammenhang mit CO-Konzentrationen ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Akute CO-Vergiftungssymptome in Abhängigkeit der aufgetretenen CO-Konzentration [Goldstein, 1998]

Konzentration	akute Symptome
bis 30 ppm (0,003 %)	keine Bei dieser Konzentration sind 8 h Arbeit erlaubt, Grenzwert in Deutschland [Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2017]
35 ppm (0,0035 %)	Kopfschmerzen, Schwindel innerhalb 6 -8 h
100 ppm (0,01 %)	Kopfschmerzen in 2 -3 h
200 ppm (0,02 %)	Kopfschmerzen innerhalb von 2 – 3 h, Verlust des Urteilsvermögens
400 ppm (0,04 %)	Starke Kopfschmerzen innerhalb 1 – 2 h
800 ppm (0,08 %)	Schwindel, Übelkeit, Krämpfe innerhalb von 45 min, Bewusstlosigkeit innerhalb von 2 h
1.600 ppm (0,16 %)	Kopfschmerzen, erhöhte Herzfrequenz, Schwindel, Übelkeit innerhalb von 20 min, Tod in weniger als 2 h
3.200 ppm (0,32 %)	Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit in 5 – 10 min; Tod innerhalb von 30 min
6.400 ppm (0,64 %)	Kopfschmerzen, Schwindel in 1 – 2 min; Krampfanfälle, Atemstillstand, Tod in weniger als 20 min
12.800 ppm (1,28 %)	Bewusstlosigkeit nach 2 – 3 Atemzügen; Tod in weniger als 3 min

Wie schon im IMK-Forschungsbericht Nr. 195 [Seliger et al., 2019] aufgeführt, treten CO-Vergiftungen immer wieder unerwartet auf. Im Folgenden werden einige Beispiele, die seit Mai 2019 eingetreten sind, aufgeführt. Diese Auflistung ist bei Weitem nicht vollständig und gibt nur einen kleinen Einblick in das aktuelle Geschehen zum Thema.

Am 02.12.2019 mussten 26 Mitarbeiter eines Automobilzulieferers bei Krauthausen (Wartburgkreis) durch Rettungskräfte und Feuerwehrangehörige gerettet werden [MDR, 2019]. Die Betroffenen klagten über Schwindel und Kopfschmerzen. Zwei von ihnen wurden schwer verletzt. In einer Halle der Qualitätskontrolle wurden erhöhte CO-Werte festgestellt. Als Ursache wird eine defekte Heizung angesehen.

In der Silvesternacht 2019 klagten mehrere Personen in einer Wohnung in Gütersloh über Kopfschmerzen, Schwindel und auch Übelkeit. Als die gerufenen Sanitäter die Wohnung betraten,

schlugen ihre CO-Warngeräte sofort Alarm. Elf verletzte Personen wurden betreut. Zwei von ihnen mussten in eine Spezialklinik mit Druckkammer gebracht werden. Das Wohnhaus und ein benachbartes Gebäude waren zur Überdruckbelüftung evakuiert worden. Erst danach konnten die Bewohner zurückkehren. Die Ursache für die CO-Anreicherung der Wohnung und damit den Vergiftungen war ein Grill, der nach dem Essen zum Abkühlen in der Wohnung aufgestellt wurde. [Westfalen-Blatt, 2020]

Am 17.10.2020 musste eine Shisha-Bar in Wiesbaden geräumt werden, nachdem bei einer Routinekontrolle eine erhöhte CO-Konzentration festgestellt wurde. Bei 35 von 78 Besuchern wurden im Blut „medizinisch relevante“ CO-Konzentrationen und Vergiftungsanzeichen festgestellt. [Frankfurter Neue Presse, 2020]

Hier wird verdeutlicht, dass diverse Quellen für die Entstehung von CO verantwortlich sein können. Es wurde eine defekte Heizungsanlage, ein mit ins Innere eines Hauses genommener Grill und die Verbrennung von Kohle bei einer Wasserpfeife aufgeführt. Überall fand eine unvollständige Verbrennung statt. Außerdem kann CO bei chemischen Reaktionen entstehen, wie dem Ausgasen von Holzpellets [Süddeutsche, 2014], [TGA-Fachplaner, 2013].

3.2 Permeation

Permeation bezeichnet einen Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper auf molekularer Ebene durchdringt (siehe z. B. [Wiegleb 2016]). Die Triebkraft ist ein Gradient des chemischen Potentials des Permeats und wird in vereinfachten Modellen durch Konzentrations- oder Druckgradienten ersetzt. Der Prozess der Permeation besteht aus 4 Teilschritten:

- Adsorption der Gasmoleküle an der Oberfläche
- Absorption (Aufnahme der Moleküle vom Material)
- Diffusionsprozess im Festkörpermateriail
- Desorption (Wiederaustritt und Ablösen der Gasmoleküle).

Genauere Angaben und grafische Darstellungen zur Permeation und dem Hauptprozess Diffusion sind der Vorgängerpublikation [Seliger et al., 2019] zu entnehmen. Da in dieser Studie keine reinen Baustoffe verwendet werden, tritt hier stets eine Kombination aus dem Prozess Permeation und dem eigenständigen Prozess Diffusion auf. Die verwendeten Wandaufbauten sind nie homogen und weisen stets Hohlräume auf, die teils mit Füllmaterialien verschlossen wurden. Diese können einen Gasraum enthalten, der hier vernachlässigt wird. Somit ergibt sich der effektive Diffusionskoeffizient D nach [Geiker et al., 1995] wie folgt:

$$D = \frac{V_P \cdot \Delta Q}{A \cdot \Delta t} \cdot \frac{L}{(c_1 - c_2)} \quad (1)$$

Dabei sind:

D	Diffusionskoeffizient [m ² /s]
V _P	Volumen der Permeat-Zelle (Zelle, die den diffundierenden Stoff aufnimmt) [m ³]
ΔQ	Anstieg der CO-Konzentration in Permeat-Zelle [kg/m ³]
Δt	Zeitintervall [s]
A	mit CO beaufschlagte Probenfläche [m ²]
L	Dicke der Probe [m]
c ₁	CO-Ausgangskonzentration [kg/m ³]
c ₂	Mittelwert der CO-Konzentration in der Permeat-Zelle im Zeitintervall [kg/m ³].

Die Herleitung von Gleichung 1 ist ebenfalls [Seliger et al., 2019] oder [Geiker et al., 1995] zu entnehmen. Dieser Diffusionskoeffizient kann für einen Gleichgewichtszustand errechnet werden. Dieser schließt sich dem instationären Initialzustand an. Dieser Zustand beschreibt die Phase, in der die diffundierenden Moleküle innerhalb des Materials in zeitlicher Abhängigkeit unterschiedliche Konzentrationsprofile aufweisen. Die Phase endet, wenn die Moleküle schließlich auf der anderen Seite des Körpers wieder heraustreten und sich eine konstante Massenänderung, also ein stationärer Verlauf, einstellt. Dieser ist gekennzeichnet durch einen nahezu linearen Konzentrationsanstieg. In dieser stationären Phase lassen sich Konzentrationsanstiege grafisch über eine lineare Regression ermitteln. Rechnerisch wird hier der Konzentrationsbereich zwischen 500 ppm und 1.000 ppm in der Permeatkammer betrachtet.

Neben dem Diffusionskoeffizienten können aus den gemessenen CO-Konzentrationen, in Abhängigkeit der Zeit, die Durchbruchzeit und die Permeationsrate bestimmt werden.

Die Durchbruchzeit sei definiert als Zeitspanne zwischen dem Anlegen eines diffundierenden Gases auf einer Seite des zu durchdringenden Festkörpers und dem Nachweis auf dessen gegenüberliegender Seite. Andere Definitionen sind möglich und können [Seliger et al., 2019] entnommen werden.

Die Permeationsrate PR bezeichnet die Stoffmenge pro Flächen- und Zeiteinheit, in Abhängigkeit von Festkörperdicke, Druck und Temperatur. In diesem Projekt wird die Permeationsrate als Maß für die Gasmenge an CO in Mikrogramm (μg) verstanden, die in einer Sekunde eine Fläche von einem Quadratmeter durchdringt. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung (2).

$$PR = \frac{c \cdot V_P \cdot M_{CO}}{V_{mol} \cdot A \cdot t} \quad (2)$$

PR	Permeationsrate [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$]
c	CO-Konzentration in der Permeatkammer (nimmt den diffundierenden Stoff auf) zum Zeitpunkt t [ppm]
V_P	Volumen Messkreislauf mit Permeatkammer [l]
M_{CO}	Molare Masse CO [g/mol]
V_{mol}	Molares Volumen CO [l/mol]
A	mit CO beaufschlagte Probenfläche [m^2]
t	Zeit [s].

Nach [Wiegleb 2016] wird die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten wie folgt berücksichtigt.

$$D_2 = D_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^3} \quad (3)$$

Der Einfluss von Temperaturschwankungen auf den Diffusionskoeffizienten (D) wird wichtig bei der Fehlerabschätzung im Rahmen des Vergleichs von Labormessungen mit den Werten aus realitätsnahen Großversuchen. Dafür werden erfasste Temperaturen (T) zunächst auf 0 °C normiert.

3.3 Datenlage aus Publikationen

Eine umfangreiche Studie zum Permeationsverhalten von CO durch verschiedene Baustoffe stellt die Veröffentlichung [Seliger et al., 2019] dar. Dort wird vor allem auf den Durchtritt von CO durch Gipskartonplatten [Hampson et al., 2013], [Pyrek, 2015], die Permeation von VOCs (volatile organic compounds) durch Wände [Blondeau et al. 2003], [Gunnarsen et al. 1994], [Meininghaus et al. 2000], [Singer et al. 2004] und die Diffusion von Blausäure und einem Reizstoff durch stark und gering poröse Baumaterialien [Thilenius et al., 1925] eingegangen. Durch die Brisanz des Themas wurde neben dem präsenten Auftreten weiterer Feuerwehr- und Rettungseinsätze in diesem Bereich in der Presse, eine andere Forschungsstudie veröffentlicht. Im zugehörigen Bericht in der Zeitschrift BrandSchutz [Scholz, 2020] wird die Untersuchung von Wandaufbauten, unterschiedlicher Dicke (L) und Zusammensetzung, in einem einfachen

Versuchsstand vorgestellt. Untersucht wurden neben einer Ziegelwand ($L = 11,5$ cm), Normalbeton ($L = 5,0$ cm), Buchen-Vollholz ($L = 4,0$ cm), Gipskartonplatte ($L = 1,5$ cm) und Porenbetonziegel ($L = 7,5$ cm). An die aufgebauten Wände wurden auf jeder Seite Plexiglaskästen herangestellt und die Verbindungen zwischen Wand und Kasten abgedichtet. Nach außen erfolgte keine Abdichtung. Durch Erwärmung von Holzkohlebriketts in einer Plexiglaskammer ließ sich eine CO-Konzentration von über 2.000 ppm erzeugen. In der anderen Kammer wurde mit einem CO-Warner die Konzentration ermittelt. Für alle Wände ergab sich ein nachgewiesener CO-Durchtritt. Kritisch sollte die nicht vorhandene Abdichtung der Wandstücke nach außen betrachtet werden. So wurde durch die Außenluft dem CO ein Raum mit sehr geringer CO-Konzentration geboten, wo ebenfalls ein CO-Austritt erfolgt sein muss. Bei der Fehlerbetrachtung hinsichtlich der Konzentrationsbestimmung hinter der Wand müssen Dicke und die mit CO beaufschlagte Fläche der Probekörper berücksichtigt werden, da sich bei größer werdenden Durchtrittsflächen der Fehler der Konzentrationsbestimmung minimiert.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der CO-Permeation durch Wandaufbauten wurde ein Prüfstand konzipiert, der es ermöglicht, Wandelemente der Größe 48 cm x 48 cm zu untersuchen. Eine detaillierte Beschreibung der Probekörper und deren möglichst realitätsnahe Konstruktion durch Abbildung der Strukturen, wie Schrauben, Fugen und Stöße, erfolgt in Kapitel 4.2.

Der Versuchsstand, dargestellt in Abbildung 1, besteht aus 2 quaderförmigen Versuchskammern mit einer Grundfläche von 50 cm x 50 cm. Diese Kammern, aus 3 mm dickem Edelstahl, liegen vertikal übereinander und sind durch den Wandaufbauprobekörper getrennt. Für die Messtechnik sowie für die Gasversorgung sind die Kammern mit 6 mm Swagelok-Anschlüssen ausgestattet, welche auch für erforderliche Dichtigkeitstests Verwendung finden.

Die obere Versuchskammer hat eine Höhe von 8 cm und dient als CO-Reservoir. Hier wird ein definiertes Gasmisch von 10.000 ppm CO in Stickstoff (N_2) mit einem Fluss von 1 l/min eingeleitet. Durch den simulierten Wandaufbau (Probekörper) permeiert das CO in die untere, 35 cm hohe Permeatkammer. Die Atmosphäre dieser Kammer wird über einen Messkreislauf mittels FTIR (Fourier-Transformation-Infrarot-Spektrometer) als Gasmessgerät überwacht.

Die Messungen beruhen auf dem Prinzip der durch Absorption von Infrarotstrahlung angeregten Molekülschwingungen und –rotationen. [Hesse, 2002] Die Gasmessung erfolgt diskontinuierlich. Datenpunkte werden in einem Intervall von ca. fünf Sekunden erfasst und aufgezeichnet. Die Messungen liefern eine Genauigkeit von $< 2\%$ des Messbereiches. Die Nachweisgrenze des Geräts beträgt 1 ppm (Ansyco GmbH, 2006).

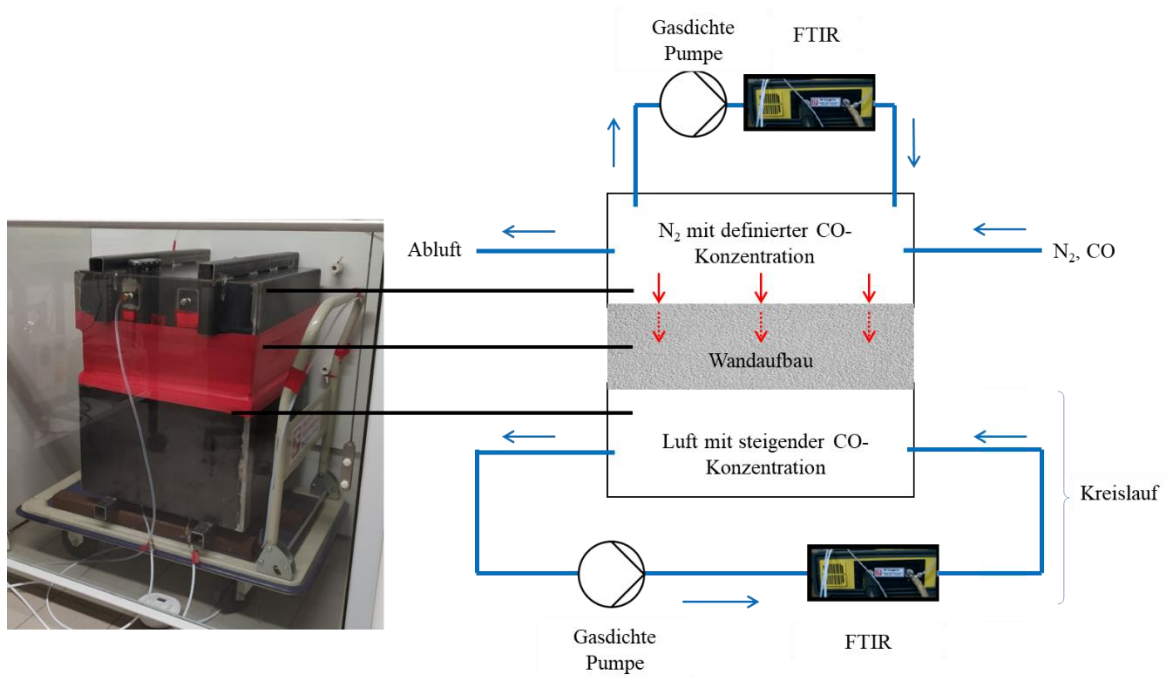


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Gaslaufschemata, links: Aufbau unter einem Laborabzug, rechts: schematische Darstellung mit Gasströmen

Der Aufbau ermöglicht ein größeres und damit realistischeres Raumvolumen im Vergleich zu den Kleinversuchen des Vorberichts. Für ein optimales Einspannen des Baustoffprobekörpers zwischen den beiden Kammern wurde jeweils ein Kragen angeschweißt. Der Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

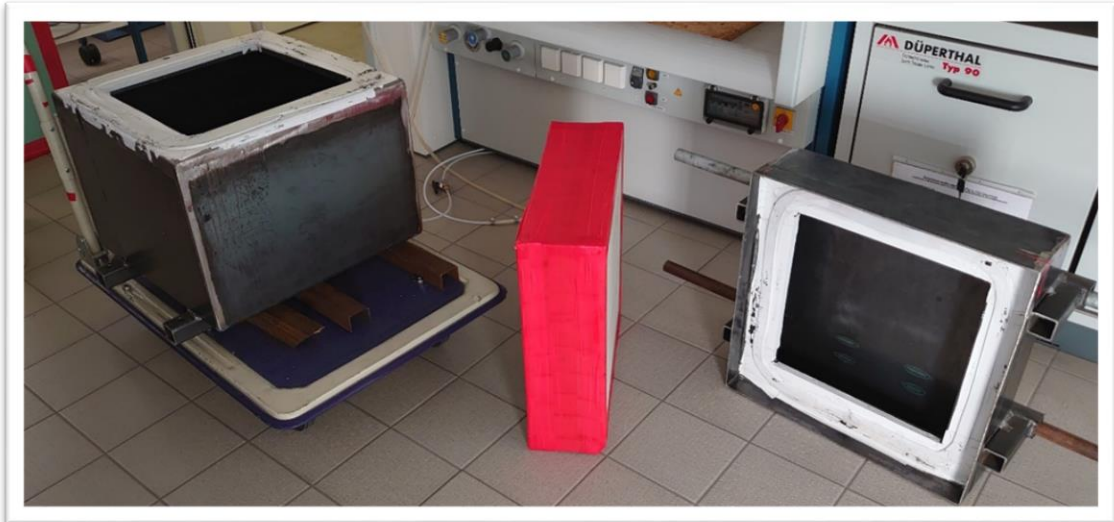


Abbildung 2: Versuchskammer mit einem Wandaufbauprobekörper; fahrbar auf einem Wagen gelagert, links: Permeatkammer, mittig: Probekörper, rechts: CO-Kammer

Die Kragen zwischen Baustoff und den beiden Kammern wurden mit Dichtband aus PTFE (Polytetrafluorethylen, ugs. Teflon), mit den Maßen 20 mm x 7 mm, isoliert. Zusätzlich erfolgte ein Überzug mit einem gasdichten Klebeband. Die Abdichtung der unteren Kammer wird in Abbildung 3 gezeigt.

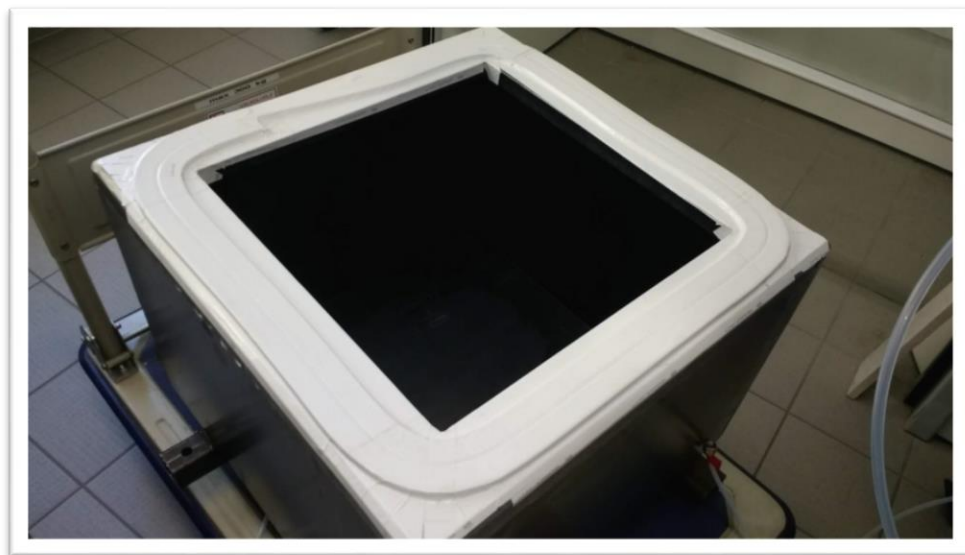


Abbildung 3: Abdichtung der Messkammer entlang des Kammerkragens

In einem Vorversuch, bei dem anstelle eines Probekörpers eine Stahlplatte eingespannt wurde, konnte überprüft werden, dass die ausgeführte Abdichtung den Gasübertritt zwischen den Kammern auf 2 ppm/h minimiert.

Eine Dichtheitsprüfung beider Kammern erfolgte vor jedem Versuch, indem Druckluft mit einem Durchfluss von 1 l/min in die jeweilige Kammer eingeleitet und mit dem Durchfluss am Gasaustritt verglichen wurde. Eine Abweichung vom Eingangsdurchfluss in Höhe von 15 % wurde als akzeptabel bewertet.

Zusätzlich, zur Gewährleistung einer vollständigen Dichtheit des zusammengebauten Versuchsstandes, ist ein gasdichtes Klebeband an den Kammerübergängen und dem Probekörper, teilweise auch mehrlagig, verwendet worden. Auch hier dient als Indikator für ausreichende Dichtheit der Vergleich zwischen Volumenstrom der Druckluft am Ein- und Austritt der Kammern.

Für die Permeationsuntersuchungen an den Probekörpern sind über entsprechende Anschlüsse an der unteren Permeatkammer ein FTIR und eine gasdichte Pumpe, in einem geschlossenen Kreislauf, installiert. Die gasdichte Pumpe fördert das Gas aus der Permeatkammer, zur Analyse der CO-Konzentration, über das FTIR wieder zurück in besagte Kammer.

Die obere Reservoirkammer ist durch eine Bohrung nach außen hin offen, damit sich dort kein Überdruck aufbauen kann, der Einfluss auf die Permeation nehmen würde und somit nicht der Realität entspräche. Die gesamte Apparatur darf somit während der Versuche nur unter einem Laborabzug betrieben werden. Zwei weitere Anschlüsse dienen dem optionalen Einsatz eines weiteren FTIR zur Messung der CO-Ausgangskonzentration, welche bei Nicht-Einsatz mittels Blindverschraubung verschlossen werden.

Nach jeder Messung müssen die Kammern ausreichend mit Druckluft gespült werden, bis kein nachweislicher CO-Austritt aus den Probekörpern mehr detektierbar ist.

4.2 Untersuchte Wandproben

Die Materialauswahl betrifft vor allem gängige Innenraumwände. Neben der Dicke L und der Durchtrittsfläche A sind die untersuchten Wandprobekörper in Tabelle 2 aufgelistet. Die Materialien und konstruierten Strukturen werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Von jedem Baustoff werden insgesamt zwei Wandprobekörper hergestellt.

Tabelle 2: Art und Maße der untersuchten Wandprobekörper

Probekörper	Dicke	Durchtrittsfläche
	L	A
	[cm]	[m²]
Gipskartoneinfachständerwand		
• unbehandelt	15,1	0,144
• Farbe	15,1	0,144
• Fliesen	15,5	0,144
• Tapete	15,1	0,144
• Dämmung Polystyrol	15,1	0,144
Mauerwerk	15,5	0,089
Holztafelwand	16,4	0,144
Bauteilanschluss mit flächigem Dichtungsband	15,4	0,144
Gleitender Deckenanschluss	15,4	0,144

4.2.1 Gipskartoneinfachständerwand

Die Gipskartoneinfachständerwand ist eine sehr häufig im Trockenbau verwendete Konstruktion. Sie wird als Trennwand zwischen Innenräumen eingesetzt. Der technische Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Zu sehen ist eine zweilagig beplankte Einfachständerwand.

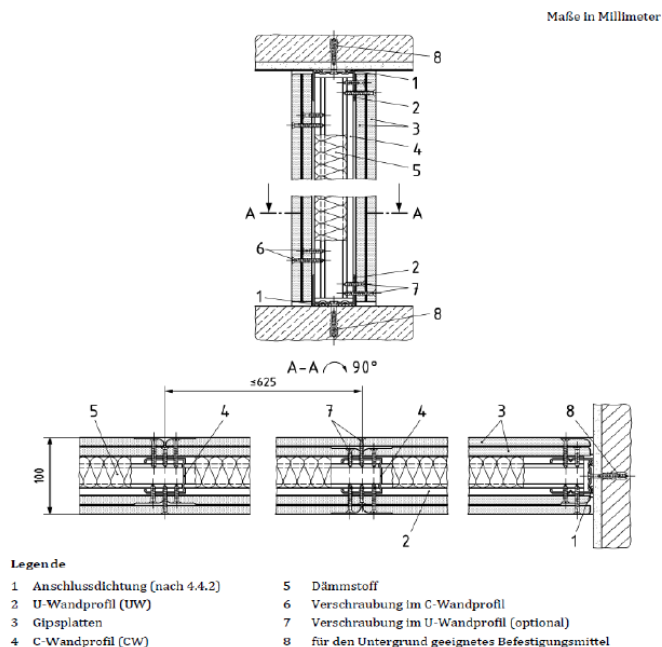


Abbildung 4: Technische Zeichnung der Gipskartoneinfachständerwand, zweilagig beplankt [DIN 18183-1, 2018]

Für eine im Labor handhabbare Größe und Anpassung wurden für den Versuchsaufbau Wandstücke nachgebaut. Es wurden drei 100 mm CW-Profile sowie zwei 100 mm UW-Profile aus Stahl zu einem Rechteck mit zwei Außenflächen der Größe von ca. 48 cm x 48 cm verbaut. Der Innenraum des Wandstücks wurde mit 100 mm dicken Mineralwollplatten nach EN13162 befüllt. Im Anschluss erfolgte die Anbringung von Gipskartonplatten am Ständerwerk mit Schnellbauschrauben (3,9 mm x 35 mm, phosphatiert) in einem Abstand von je 15 cm. Durch Versenken der Schrauben ließ sich eine einheitliche Oberfläche erzielen. Bei der Doppelbeplankung wurde darauf geachtet, dass bei jeder Seite je eine Gipskartonplatte mit und eine ohne Stoß ausgeführt wurde. Der unbeplankte sowie finale Zustand des Probekörpers sind in Abbildung 5 zu sehen.



Abbildung 5: Gipskarton-Probekörper links: unbeplankt; rechts: beplankt

Neben dem Aufbau einer einfachen Gipskartonwand als Probekörper wurden zudem Aufbauten mit behandelter Oberfläche dargestellt. Dabei sind die Wandoberflächen mit Wandfarbe, Fliesen und Tapete modifiziert worden.

Bei der Wandfarbe wurden die Gipskartonprobekörper mit zwei Lagen Dispersionsfarbe auf Wasserbasis gestrichen. Bei der Herstellung der Probekörper mit Tapete kam ein handelsüblicher Tapetenkleister zum Einsatz.

Für die Oberflächen mit Fliesenspiegel wurden nach einseitiger Tiefengrundierung zum einen Fliesen der Größe 4,5 cm x 4,5 cm x 2 cm (FL1) und zum anderen der Größe 20 cm x 20 cm x 2 cm (FL2) mit zementhaltigem Mörtel nach DIN EN 12004:2012 auf den Gipskarton angebracht. Im Anschluss wurden die Fliesenzwischenräume mit Fugenbunt gefüllt. Die Fliesengrößen sind so gewählt, dass die ganze Probenfläche gefüllt werden konnte, ohne einzelne Fliesen zerschneiden zu müssen. Die Probekörper sind in Abbildung 6 (mittig und rechts) gezeigt.



Abbildung 6: links: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit Polystyrol­dämmung, einseitig noch unbeplankt; mittig: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit einseitiger Fliesenoberfläche (klein), rechts: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit einseitiger Fliesenoberfläche (groß).

Darüber hinaus zeigt Abbildung 6 einen Probekörper mit Polystyrol als alternativem Dämmmaterial. Anstatt der Dämmwolle kam eine 10 cm dicke Polystyrolplatte zum Einsatz, die von oben in den Rahmen eingeschoben und durch Niete fixiert wurde. Üblicherweise werden Polystyrolplatten nicht als Dämmmaterial für Trockenbauwände verwendet, sondern an Wandoberflächen geklebt [EuroBaustoffe, 2021]. Eine Anbringung von außen hätte die Polystyrolplatte beim Einlegen in die Versuchsanlage zerdrückt. Durch das Verbauen im Ständerwerk konnte die Untersuchung dieser Dämmvariante jedoch realisiert werden. Von einer Beeinflussung der Gesamtpermeation durch die Position des Dämmmaterials wird nicht ausgegangen.

4.2.2 Holztafelwand

Im Bereich nachwachsender Rohstoffe wird die ebenfalls im Innenausbau verwendete Holztafelwand gewählt. Die Fertigung dieser Probekörper erfolgte nach Anleitung [Holzforschung Austria, 2021], allerdings wurde hier die Wand, statt in doppelter, nur in einfacher Dicke gefertigt. In Abstimmung mit Mitarbeitern der Hochschule Magdeburg-Stendal [Sudhoff, 2020], aus dem Bereich baulicher Brandschutz, wurde der in Tabelle 3 dargestellte Aufbau gewählt.

Tabelle 3: Schichten im Holztafelwandaufbau [Sudhoff, 2020]

Schichtdicke	Material
12,5 mm	Gipskartonplatte oder Gipsfaserplatte mit Fugenstoß, verspachtelt
18 mm	OSB-Platte
100 mm	Rahmen aus Konstruktionsholz 60 mm x 100 mm, mit Dämmschicht Mineralwolle
18 mm	OSB-Platte, mit Fugenstoß stumpf auf Ständer
12,5 mm	Gipskartonplatte

Zum Aufbau der Wand wurden zwei Konstruktionsholzbalken quer und drei längs verbaut, so dass sich eine Wand mit der Dicke von 100 mm ergab. Die resultierenden Hohlräume wurden mit Mineralwolle ausgefüllt. An beiden Seiten sind im Anschluss 18 mm starke OSB-Platten nach EN 13986: OSB 3 E1 ungeschliffen angebracht worden, wobei auf einen einseitigen Stoß zwischen 2 Platten geachtet wurde. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde stoßfrei gearbeitet. Die Verbindung der Platten erfolgte über das Feder-Nut-System. Die Befestigung der Platten erfolgte mittels Holzschrauben am Holzrahmen. Im Anschluss wurden an beiden Seiten Gipskartonplatten mit Schnellbauschrauben angebracht. Seitens ohne Stoß der OSB-Platten wurden die Gipskartonplatten mit Stoß verbaut, der im Anschluss mit Feinspachtelmasse nach DIN EN13963 verschlossen wurde. Zwei Verarbeitungsschritte sind in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: links: Holztafelbauprobekörper von hinterer Seite beplankt, Hohlräume mit Mineralwolle verfüllt; rechts: verspachtelter Stoß der Gipskartonschicht an der Holztafelwand

4.2.3 Mauerwerk-Kalksandstein

Hinsichtlich der Abgrenzung von Räumen müssen auch gemauerte Wände betrachtet werden. Dazu wurden Probekörper aus Kalksandstein gemauert. Zur Herstellung dieser Probekörper wurden Normalmauersteine (Maße: 24 cm x 11,5 cm x 7,1 cm) im Läuferverband eingesetzt.

Zum Verbinden der Steine diente Normalmauermörtel nach EN998-2:2016 in 12 mm Stärke. Zur Anfertigung der Probekörper wurde mit einem Versatz von zwei Steine breit gemauert. Nach Abtrennung des Überstandes ergab sich der Probekörper, wie in Abbildung 8 dargestellt. Für die waagerechte Einspannung der Wandprobe in die Versuchsanordnung wurde ein Stahlgestell konzipiert. Aus der Stützkonstruktion, inklusive Mittelsteg und zusätzlicher Abdichtung, ergab sich eine verringerte Durchtrittsfläche im Vergleich zu den anderen Wandprobekörpern (siehe Tabelle 2).

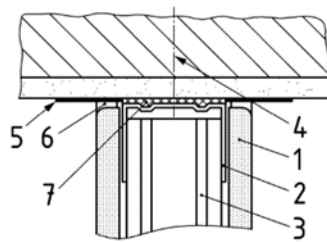


Abbildung 8: links: Probekörper aus gemauerten Kalksandsteinen; Mitte: mit stabilisierendem Stahlrahmen; rechts: mit Isolierung

Trotz Stahlgestell zur Stützung konnte dieser Wandprobekörper nicht in der konzipierten Apparatur hinsichtlich seiner CO-Durchlässigkeit untersucht werden. Auf Grund des Eigengewichts kam es bei der waagerechten Einspannung zur Rissbildung an den Fugen. Bei einer aufrecht stehenden Mauer entstehen solche Risse wegen des hohen Eigengewichts nicht. Entsprechend liegen für diesen Wandaufbau keine Messergebnisse vor.

4.2.4 Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung

Neben den Innenwänden wurden auch Bauteilanschlüsse untersucht. Damit sollte der Gasdurchtritt an den Stellen, an denen zwei Wände bzw. Decken aufeinanderstoßen, untersucht werden. Zunächst wurden Probekörper mit flächiger Anschlussdichtung zwischen einer Gipskartoneinfachständerwand und einer Betonwand gebaut. Der Anschluss erfolgte nach DIN 18183-1, mit einem durchgehenden Dichtungsband. Die technische Zeichnung ist in Abbildung 9 dargestellt.

**Legende**

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 Gipsplatte | 5 Trennstreifen |
| 2 U-Wandprofil (UW) | 6 Verspachtelung |
| 3 C-Wandprofil | 7 flächige Abdichtung (Dichtungsband) |
| 4 für Untergrund geeignetes Befestigungsmittel | |

Abbildung 9: Technische Zeichnung Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung (durchgehen des Dichtungsband) [DIN 18183-1, 2018]

Für diese Art der Wandprobekörper wurde neben einem Gipskartonkörper, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, mit den Maßen 48 cm x 24 cm, je ein gleichgroßer, in einer Holzschalung gegossener, Betonkörper, angefertigt. Hierfür wurden 40 kg Trocken-Beton der Festigkeitsklasse B 25 mit vier Litern Wasser vermischt. Dieser wurde 5 Tage an der Luft getrocknet.

Als Dichtband zwischen beiden Teilen diente ein 95 mm breites Mischfaserfließ mit einer Stärke von 3 mm. Beide Teile wurden mittels Spreizdübel ($\varnothing$ 8 mm) und Schrauben ($\varnothing$ 6 mm) miteinander verbunden. (Abbildung 10)

Die Versuchsanordnung erlaubt nur flächig ausgeführte Probekörper, so dass die, in der technischen Zeichnung dargestellten, Trennstreifen und Verspachtelung nicht ausgeführt wurden.

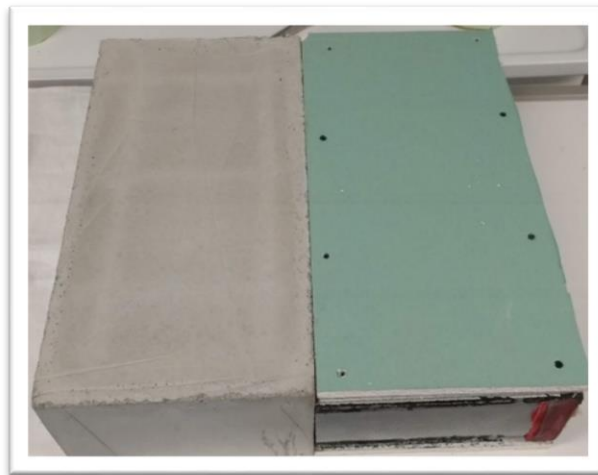


Abbildung 10: Probekörper mit flächiger Anschlussdichtung, noch ohne Isolierband

4.2.5 Gleitender Deckenanschluss

Als weiterer Bauteilanschluss wurde der zwischen einer Gipskartoneinfachständerwand und einer Betondecke nach DIN 4102-4 [DIN 4102-4, 2016] gleitende Deckenanschluss gewählt. Die technischen Zeichnungen zur Ausführung sind in Abbildung 11 angegeben.

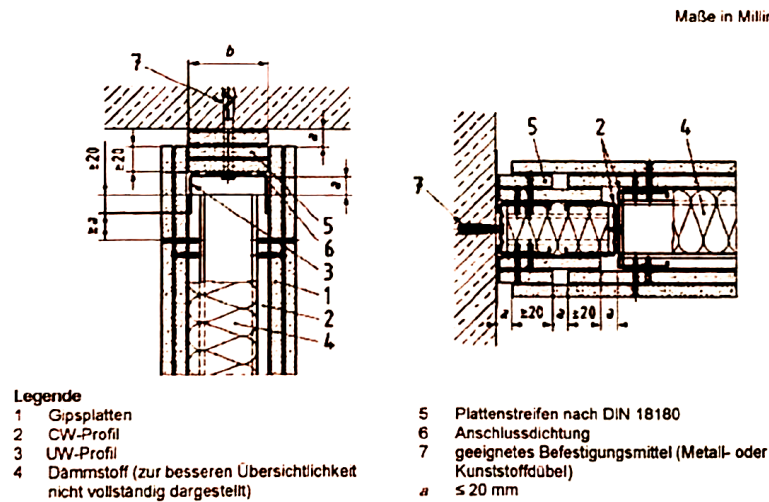


Abbildung 11: Technischer Aufbau gleitender Deckenanschluss [DIN 4102-4, 2016]

Zur Herstellung der Probekörper wurde ein Betonkörper der Größe 48 cm x 24 cm, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, hergestellt. Von diesem Betonkörper ausgehend wurde ein Übergangsstück angebracht, welches aus den folgenden Komponenten besteht: Streifen Mineralwolle (Stärke 15 mm), Gipskartonstreifen (48 cm x 7,5 cm x 1,25 cm) und UW-Profil aus Stahl (100 mm). Mit zwei Spreizdübeln konnte das Übergangsstück, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, montiert werden. Im Anschluss wurde die Gipskartonwand aufgebaut. Der Herstellungsschritt vor dem Verfüllen der Gipskartonwand ist in Abbildung 12 gezeigt.



Abbildung 12: Fertigung gleitender Deckenanschluss: unten Betonkörper, darüber Verbindungsschichten, oben: Gipskartonwand einseitig beplankt

4.2.6 Abdichten der Probekörper

Wie bereits angedeutet, mussten die Probekörper seitlich abgedichtet werden, um die CO-Permeation in eine Richtung sicherzustellen. Damit wurde zum einen, bei einem seitlichen Austritt, ein Diffundieren des CO in die Umgebungsluft und zum anderen ein Bypass entlang der Seiten des Probekörpers in Verbindung mit einem erhöhten CO-Eintritt in die Permeatkammer verhindert.

An den Seiten der Probekörper und in Verlängerung auch in Bereichen der Ober- und Unterseite der Versuchsobjekte wurde zur Abdichtung beidseitig klebendes Butylkautschukband verwendet. Das Klebeband besitzt ein hohes Anpassungsvermögen bei unterschiedlichsten Oberflächen, wodurch Unebenheiten an den Seiten des Probekörpers kompensiert werden konnten.

Das Butylkautschukband (schwarz) wurde anschließend durch ein weiteres, einseitig klebendes, gasdichtes Band (rot) zusätzlich abgedichtet. So sollte zusätzlich Gasdichtheit erreicht werden sowie ein Verkleben des Butylkautschukbands an der Versuchsanordnung verhindert werden. Die Abdichtungen sind in Abbildung 13 gezeigt.



Abbildung 13: links: schwarzes, beidseitig klebendes Butylkautschukband auf den Seitenflächen des Probekörpers; rechts: Abklebung mit rotem, gasdichtem Klebeband (final isolierter Wandprobekörper)

4.3 Messergebnisse, verarbeitete Daten und Diskussion der Laborergebnisse

Bis auf den Mauerwerk-Wandprobekörper konnte an allen untersuchten Wandaufbauten die CO-Permeation erfolgreich nachgewiesen werden. Von jedem Wandaufbau wurden zwei Probekörper hergestellt und diese mindestens zwei Mal, durch Beaufschlagung mit 10.000 ppm hinsichtlich ihrer Permeation von CO, untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden einzeln dargestellt.

4.3.1 Gipskartoneinfachständerwand

Die eingehenden Untersuchungen der unbehandelten Gipskarton-Wandprobekörper bilden die Grundlage für die Betrachtung des CO-Permeationsverhaltens, insbesondere bei verschiedenen Innenraumgestaltungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel Farbanstrich, Tapeten und Fliesen. Zunächst werden zwei blanke Gipskarton-Probekörper (GK1, GK2) betrachtet. Die mittels FTIR erfassten, zeitlichen CO-Konzentrationsverläufe der oberen Reservoir- und der unteren Permeatkammer werden gegenübergestellt. Die Konzentrationsverläufe sechs unabhängiger Messungen sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Übereinstimmungen der Kurvenverläufe weisen auf eine gute Reproduzierbarkeit hin. Die in die obere Kammer einströmende CO-Konzentration von 10.000 ppm wird nicht erreicht, was sich auf die Kammergröße zurückführen lässt. Im Gleichgewicht stellt sich in der Reservoirkammer eine mittlere CO-Konzentration von 8.200 ppm ein. Dieser Wert dient als Ausgangskonzentration c_1 für die folgenden Berechnungen der Diffusionskoeffizienten und Permeationsraten.

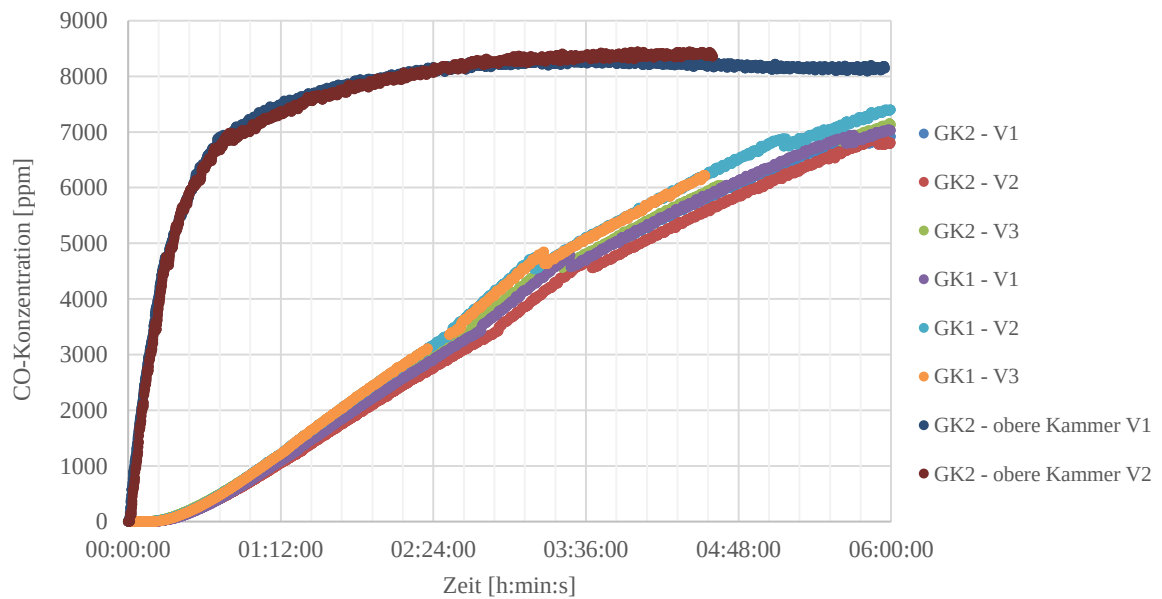


Abbildung 14: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf in beiden Kammern bei der Permeation an einer Gipskartoneinfachständerwand, unbehandelt (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO)

Für die untere Permeatkammer zeigt sich nach dem Durchbruch ein weitestgehend linearer Anstieg der Konzentration. Die gemittelte Durchbruchzeit des CO, das heißt der Nachweis von 1 ppm CO in der Permeatkammer, beträgt im Mittel ca. 11 Minuten. Nach insgesamt 45 Minuten wird eine CO-Konzentration von 500 ppm und nach 66 Minuten von 1.000 ppm detektiert. Die gemittelten Konzentrationsverläufe infolge der Permeationsvorgänge für beide Kammern sind in Abbildung 15 dargestellt. Die mittlere Permeationsrate, nach Formel (2), ist Abbildung 16 zu entnehmen. Als Fehlerindikatoren sind die absoluten Standardabweichungen angegeben, die sich aus den Einzelmessungen untereinander ergeben.

Die Grafiken verdeutlichen die Abnahme der Triebkraft der Permeation gegen Ende des dargestellten Intervalls. Pro Zeiteinheit tritt hier weniger CO durch den Probekörper als im mittleren Bereich des Grafen.

Der Diffusionskoeffizient für die unbehandelte Gipskartoneinfachständerwand wird nach Formel (1) mit

$$D_{GK} = 8,194 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

bestimmt. Er liegt damit im Bereich der in [Seliger et al., 2019] ermittelten Werte für reine Baustoffe. Für die Berechnung wird der CO-Konzentrationsbereich zwischen, in der Permeatkammer erreichten, 500 ppm und 1.000 ppm herangezogen.

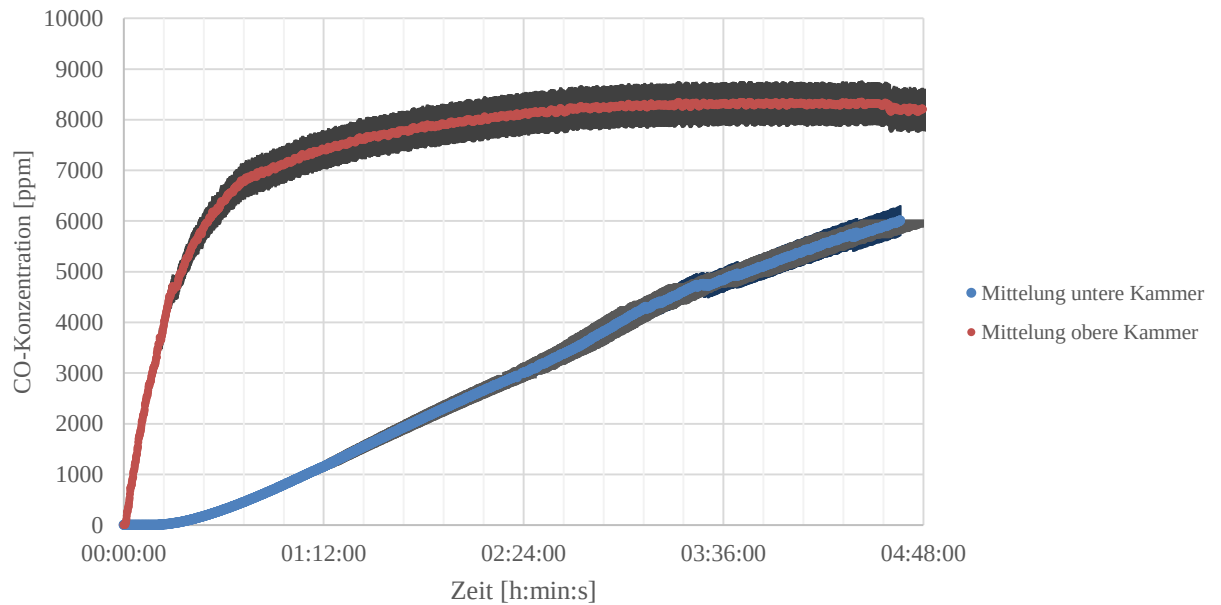


Abbildung 15: Mittelwerte der zeitlich abhängigen CO-Konzentration in den Kammern für unbehandelte Gipskartoneinfachständerwände GK1 und GK2 (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO)

Für den stationären Bereich des Konzentrationsanstiegs lässt sich durch lineare Regression eine mittlere Rate von 0,40 ppm/s ermitteln. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden R^2 beträgt 0,9955.

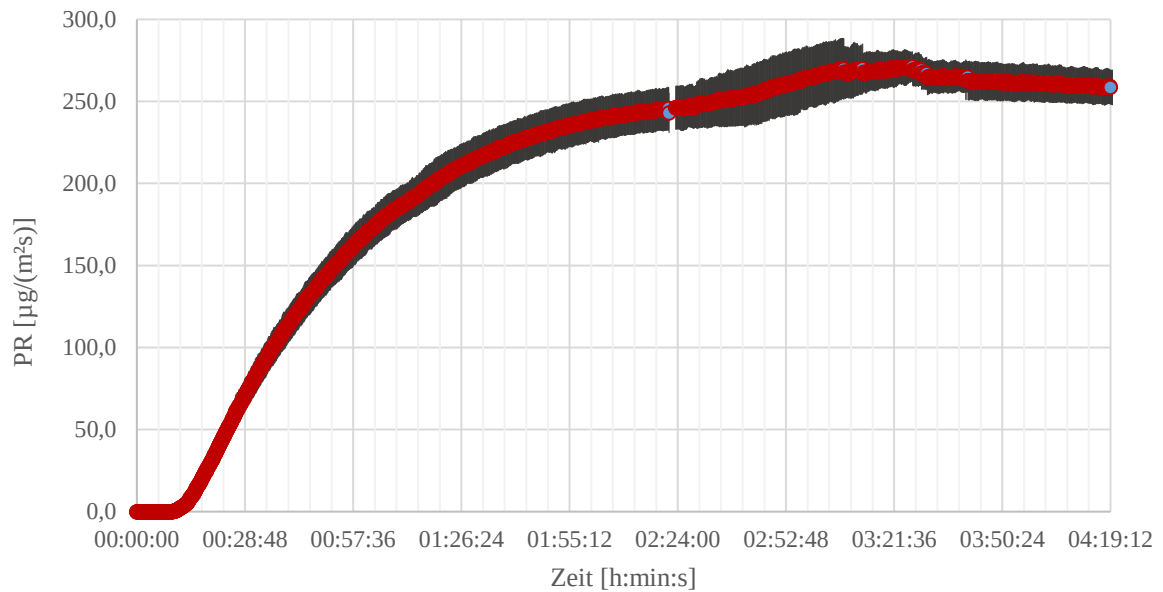


Abbildung 16: gemittelte Permeationsrate für unbehandelte Gipskartoneinfachständerwände GK 1 und GK2 (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO)

4.3.2 Modifizierte Gipskartoneinfachständerwände

Der generelle Konzentrationsverlauf des CO in den Kammern ist durch die Messungen der Gipskarton-Wandprobekörper bekannt. Somit werden die folgenden Versuche beendet, sobald sich eine CO-Konzentration von 1.200 ppm in der Permeatkammer einstellt. Auch die Konzentration in der Reservoirkammer wird nicht erneut erfasst, sondern von den unter 4.3.1 beschriebenen Versuchen übernommen.

4.3.2.1 Wandfarbe

Die folgende Abbildung 17 zeigt die zeitlichen Konzentrationsverläufe der einzelnen Versuche der mit Wandfarbe modifizierten Wandaufbau-Gipskartonprobekörper. Hier zeigen sich nahezu deckungsgleiche Verläufe.

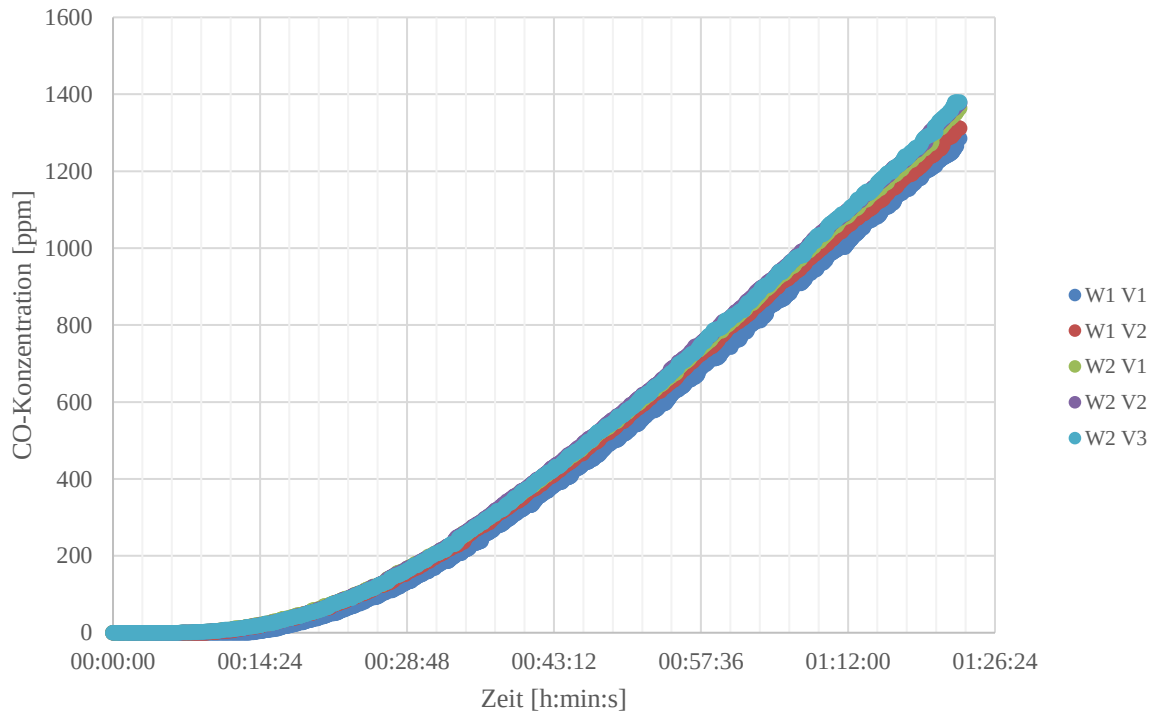


Abbildung 17: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Wandfarbe modifizierten Gipskartoneinfachständerwände W1 und W2

Aus den Daten lässt sich eine Durchbruchzeit von 8 Minuten ermitteln. Nach 47 Minuten werden 500 ppm permeiertes CO detektiert und nach 68 Minuten 1.000 ppm. Der Diffusionskoeffizient wird nach Formel (1) mit

$$D_W = 6,705 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

berechnet. Abbildung 18 zeigt den gemittelten CO-Konzentrationsverlauf in der Permeatkammer und die mittlere Permeationsrate nach Formel (2) inklusive der Fehlerindikatoren.

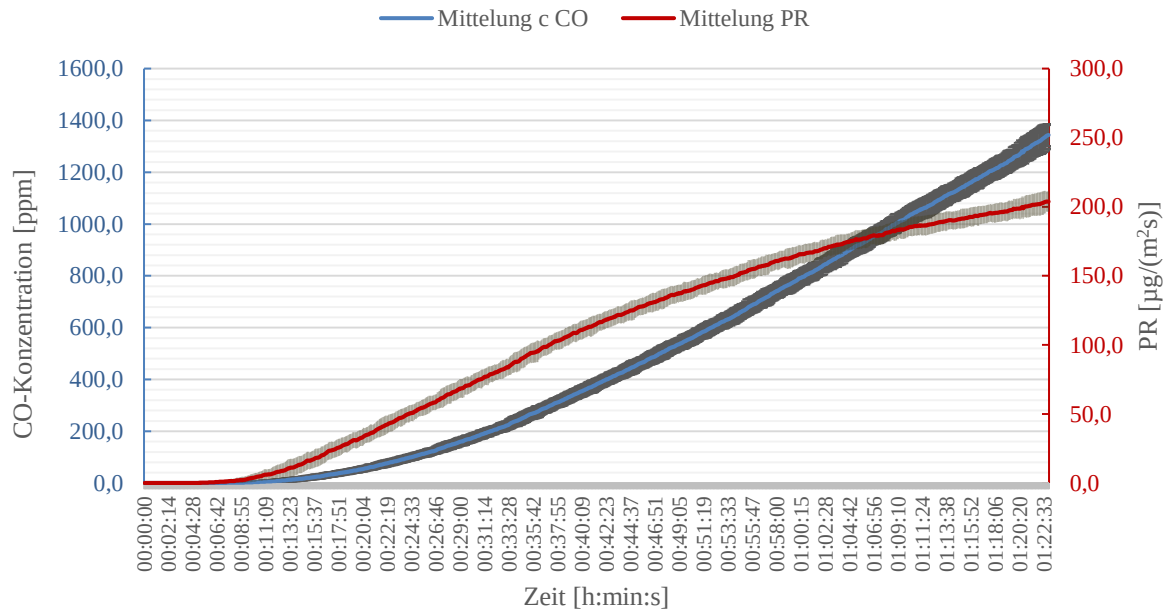


Abbildung 18: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Wandfarbe modifizierten Gipskartoneinfachständerwände W1 und W2

Aus der mittleren CO-Konzentration ergibt sich über eine lineare Regression ein CO-Anstieg von 0,30 ppm/s mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9538.

4.3.2.2 Fliesen

Im Folgenden sind in Abbildung 19 die sich entwickelnden CO-Konzentrationen in der Permeatkammer dargestellt, die sich durch Beaufschlagung der gefliesten Wandaufbauprobekörper ergeben.

Die unterschiedlichen verwendeten Fliesen haben einen deutlichen Einfluss auf das Permeationsverhalten (Vergleiche Abbildung 6). Bei Probekörper FL1 permeiert das CO schneller, was sich auf den größeren Fugenanteil zurückführen lässt. Auf eine Mittelwertbetrachtung wird hier aus diesem Grund verzichtet. Für die Berechnungen werden die beiden Probekörper somit separat betrachtet.

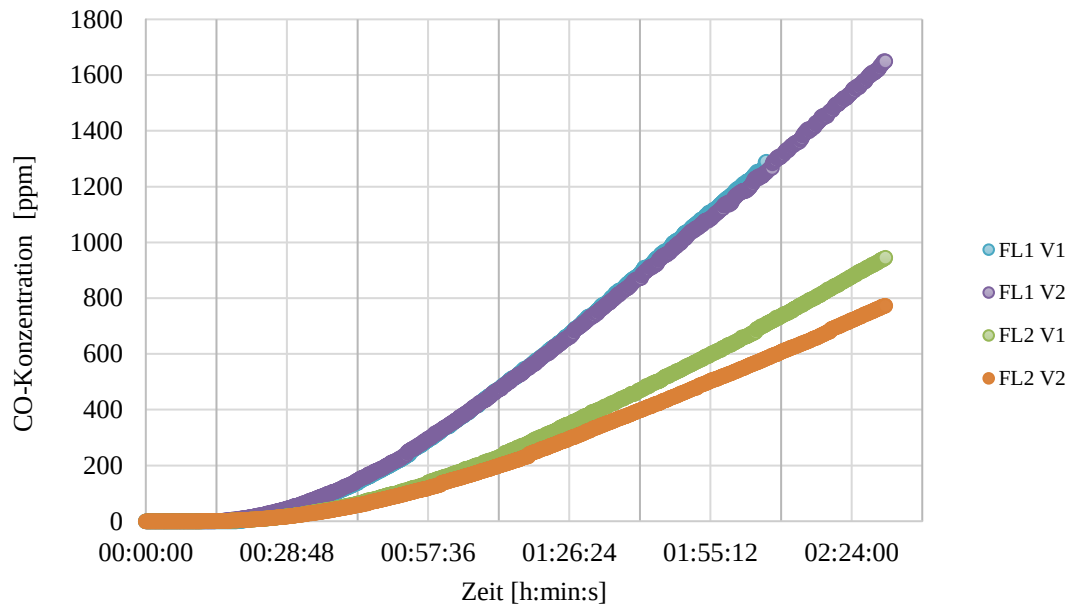


Abbildung 19: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände FL1 und FL2

Nach Formel (1) ergeben sich für die beiden gefliesten Probekörper die Diffusionskoeffizienten der jeweils doppelt durchgeführten Messungen zu:

$$D_{FL\,1} = 4,203 \cdot 10^{-6} \, m^2/s$$

$$D_{FL\,2} = 2,538 \cdot 10^{-6} \, m^2/s$$

Für den ersten Probekörper FL1 ergibt sich eine Durchbruchzeit von 15 Minuten, während bei FL2 sich jene mit 13 Minuten ermitteln lässt. Die eigentlichen Unterschiede zeigen sich bei der Dauer bis zum Erreichen höherer Konzentrationen. 500 ppm werden bei FL 1 bereits nach 74 Minuten detektiert. Bei FL 2 wird diese Konzentration erst nach 108 Minuten erreicht. Nach dieser Zeit ist bei FL 1 bereits die doppelte Konzentration von 1.000 ppm erreicht. Diese wurde bei FL 2 erst nach 165 Minuten gemessen.

Abbildung 20 und Abbildung 21 veranschaulichen, unter Berücksichtigung der relativen Standardabweichung, die gemittelten Konzentrationsverläufe sowie die Permeationsraten der untersuchten mit Fliesen modifizierten Gipskartonwandprobekörper.

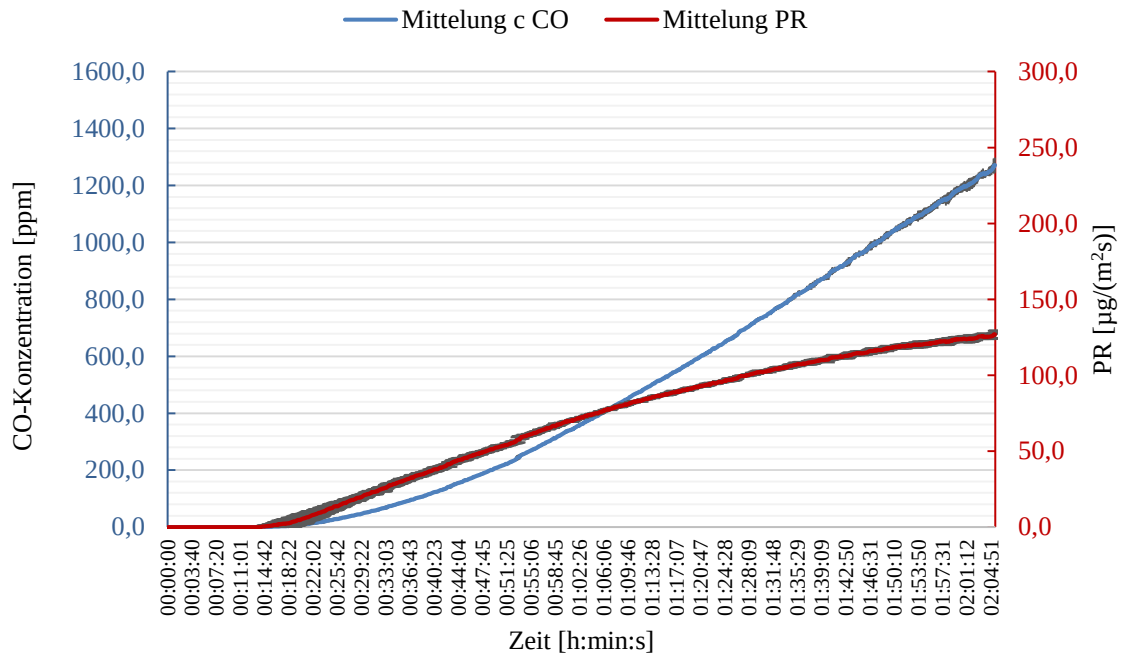


Abbildung 20: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände mit großem Fugenanteil FL1

Für FL1 beträgt der, durch lineare Regression berechnete, CO-Anstieg $0,20 \text{ ppm/s}$ ($R^2 = 0,9718$) und ist damit nahezu doppelt so groß, wie der von FL2 mit $0,12 \text{ ppm/s}$ ($R^2 = 0,9662$).

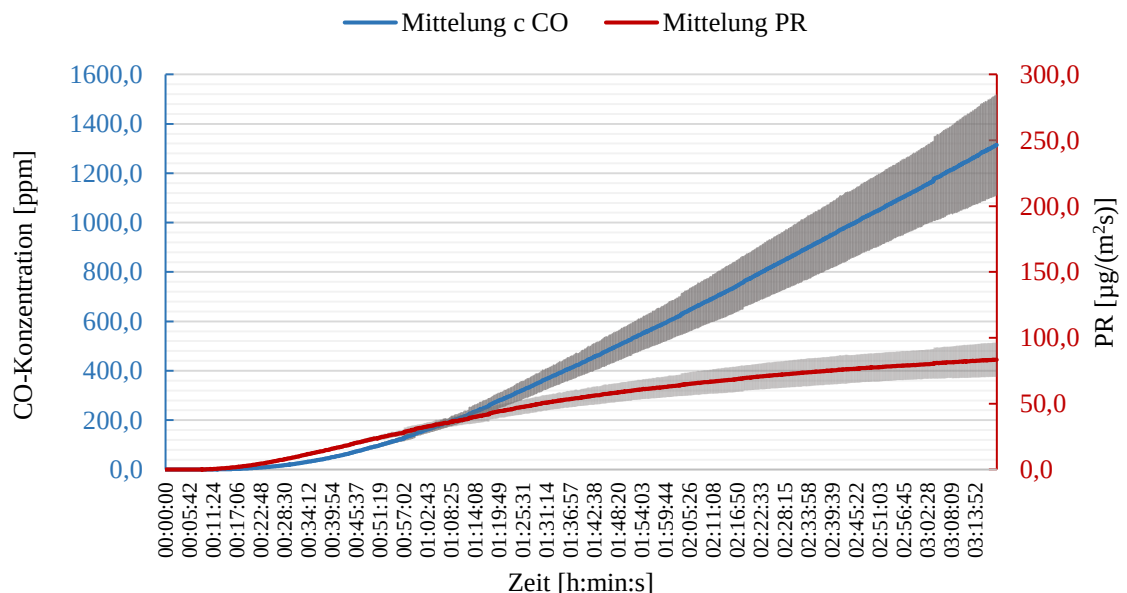


Abbildung 21: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände mit geringem Fugenanteil FL2

4.3.2.3 Tapete

Des Weiteren zeigt Abbildung 22 die auf der Permeation beruhenden CO-Konzentrationsverläufe bei den mit Tapete modifizierten Wandprobekörpern. Die vier durchgeführten Messungen zeugen von guter Reproduzierbarkeit.

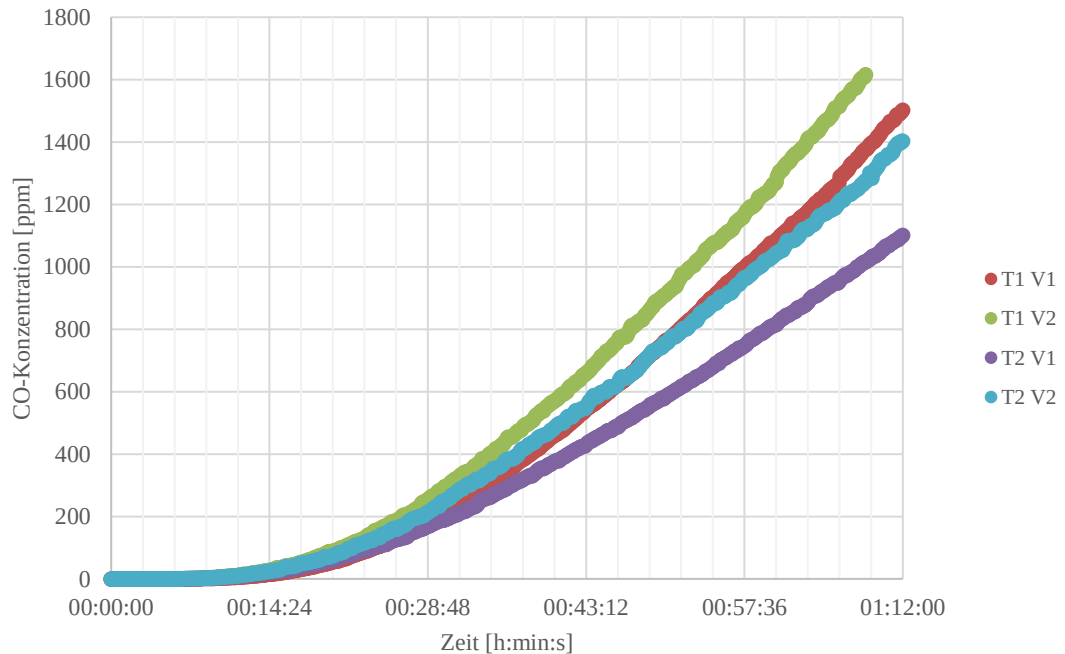


Abbildung 22: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Tapete modifizierten Gipskartoneinfachständerwände T1 und T2

Aus den Messungen ergibt sich eine mittlere Durchbruchzeit von sieben Minuten. Die Konzentration von 500 ppm CO wird im Mittel nach 41 Minuten und 1.000 ppm CO nach 59 Minuten erreicht. Daraus ergibt sich nach Formel (1) ein Diffusionskoeffizient für die mit Tapete versehenen Probewandkörper zu:

$$D_T = 8,409 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

In der anschließenden Abbildung 23 sind die gemittelten zeitlichen CO-Konzentrationsverläufe und die sich nach Formel (2) daraus ergebenden CO-Permeationsraten aus den vier Einzelmessungen dargestellt.

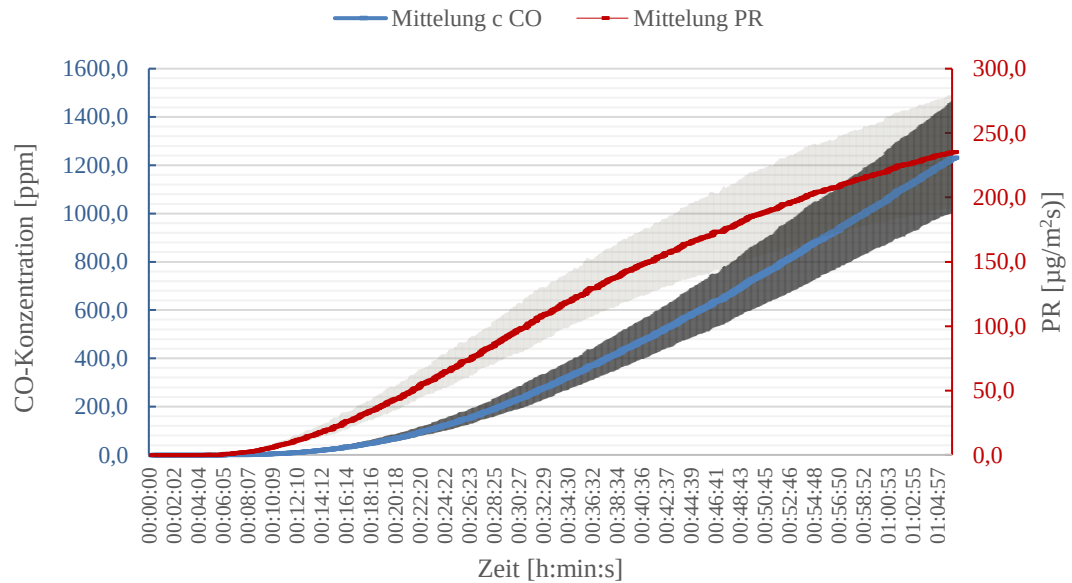


Abbildung 23: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Tapete modifizierten Gipskartoneinfachständerwände T1 und T2

Der sich aus der linearen Regression ergebende CO-Anstieg beträgt 0,33 ppm/s mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9326.

4.3.2.4 Polystyrolämmung

Neben der Außenmodifizierung von Wandaufbauten wird auch der Einfluss einer Polystyrolämmung untersucht. Die Einzelmessungen zeigen untereinander wieder eine gute Übereinstimmung, wie Abbildung 24 verdeutlicht.

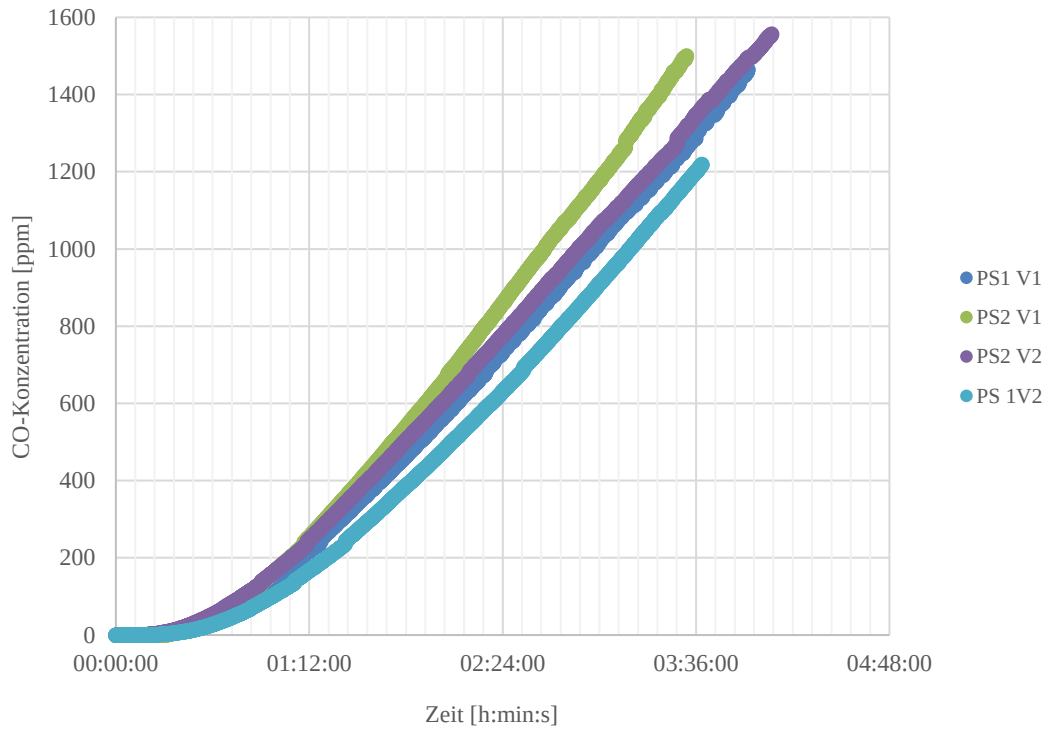


Abbildung 24: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Polystyrol als Dämmmaterial modifizierten Gipskartoneinfachständerwände PS1 und PS2

Aus den Messungen wird die mittlere Durchbruchzeit von 14 Minuten bestimmt. Eine CO-Konzentration von 500 ppm stellt sich nach ca. zwei Stunden (122 Minuten) ein. 1.000 ppm CO in der Permeatkammer werden erst nach über drei Stunden (191 Minuten) detektiert. Aus den Daten berechnet sich nach Formel (1) der Diffusionskoeffizient zu:

$$D_{PS} = 2,070 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Neben der mittleren CO-Konzentration ist die sich daraus ergebende CO-Permeationsrate nach Formel (2) in der folgenden Abbildung 25, einschließlich der Fehlerindikatoren, dargestellt.

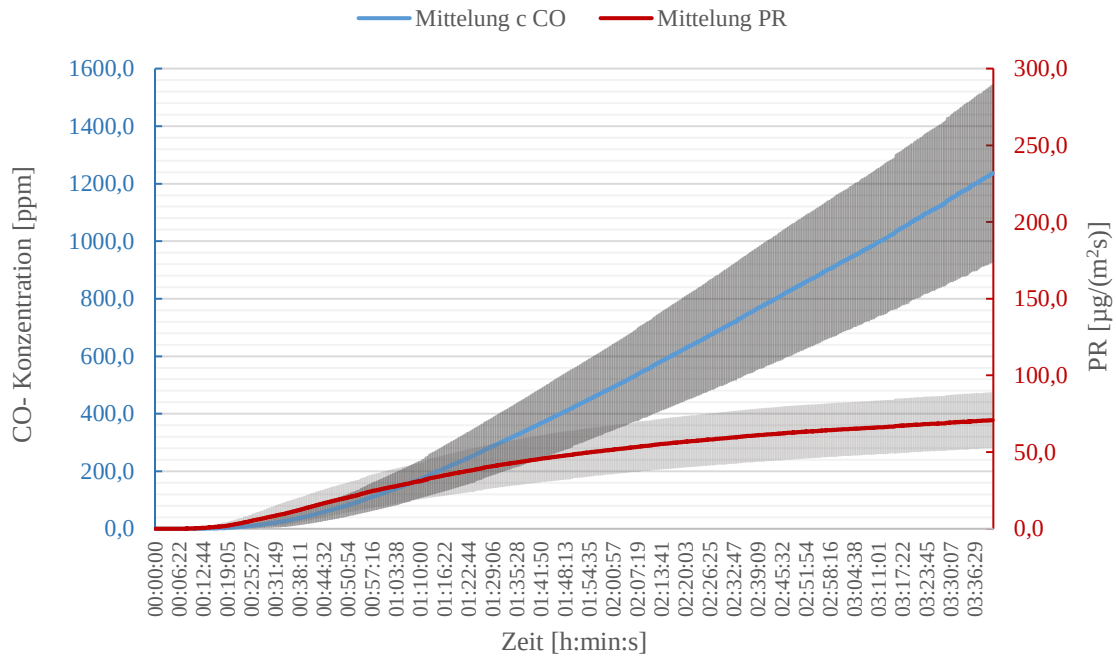


Abbildung 25: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Polystyrol als Dämmmaterial modifizierten Gipskartoneinfachständerwände PS1 und PS2

Für den Polystyrol-Wandprobekörper wird ein mittlerer CO-Anstieg von 0,10 ppm/s ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression beträgt dabei 0,9766.

4.3.3 Holztafelwand

Auch der Sektor der nachwachsenden Rohstoffe soll durch Untersuchung von Holztafelwandprobekörpern beleuchtet werden. Abbildung 26 zeigt die Entwicklungen der CO-Konzentrationen in der Permeatkammer unter Einsatz der Holzwandprobekörper. Drei der vier Messungen zeigen einen nahezu deckungsgleichen Konzentrationsverlauf. Bei der Messung H1 V1 zeigte sich die CO Permeation etwas langsamer. Dies kann auf Unterschiede bei der Abdichtung hindeuten. Auf Grund der langen Zeitskala ist die Abweichung an dieser Stelle vernachlässigbar.

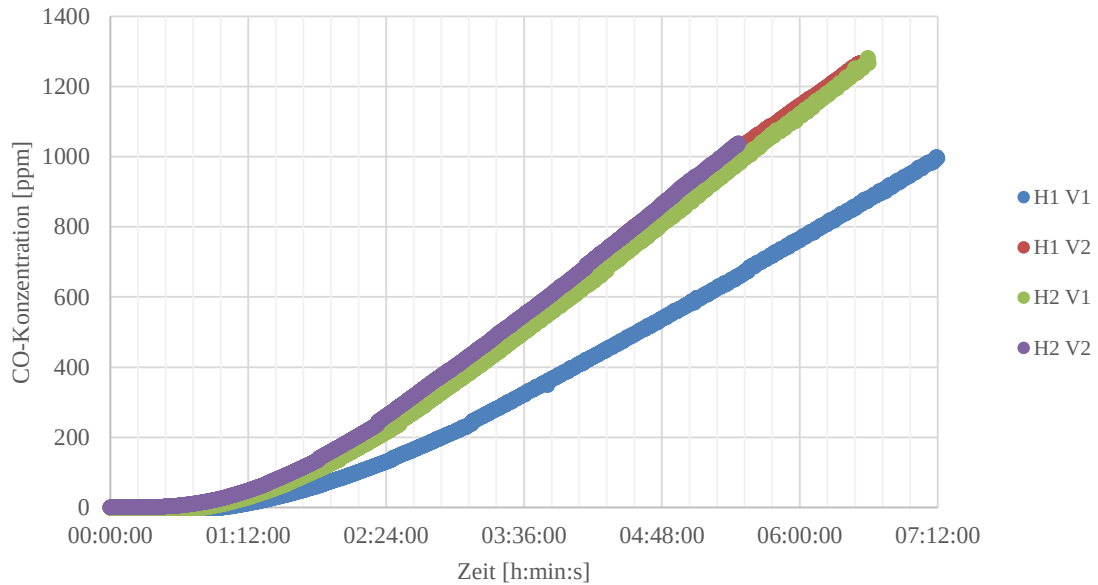


Abbildung 26: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Holztafelwände-Wandprobekörper H1 und H2

Aus den Messungen der Holztafelwandprobekörper ergibt sich eine mittlere Durchbruchzeit von 30 Minuten. 500 ppm werden im Schnitt nach 3 Stunden und 41 Minuten in der Permeatkammer erreicht. Für das Erreichen einer CO-Konzentration von 1.000 ppm sind annähernd 6 Stunden (357 Minuten) nötig. Daraus berechnet sich unter Verwendung von Formel (1) der Diffusionskoeffizient für die Holztafelwandaufbauten mit:

$$D_H = 1,150 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Unter Zuhilfenahme von Formel (2) ergibt sich mit der mittleren CO-Konzentration die ebenfalls in Abbildung 27 dargestellte CO-Permeationsrate.

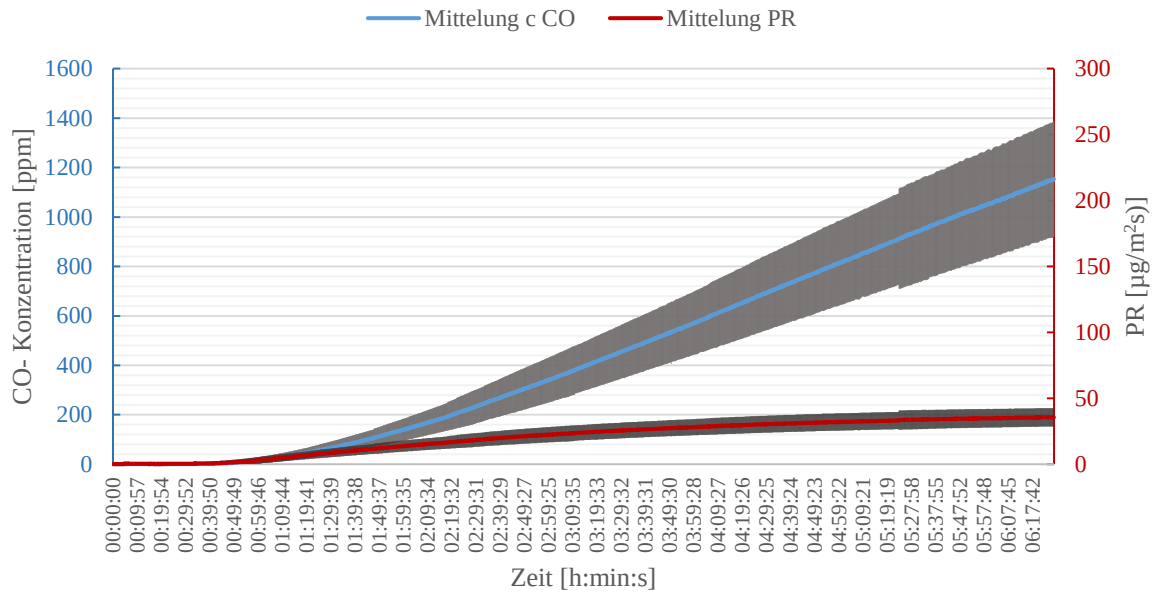


Abbildung 27: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Holztafelwände H1 und H2

4.3.4 Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung

Zusätzlich zu Innenwänden sind Bauteilanschlüsse Teil der Untersuchungen. Bei der flächigen Anschlussdichtung zwischen Gipskartoneinfachständer- und Betonwand wurden die in Abbildung 28 dargestellten zeitlichen CO-Konzentrationsverläufe experimentell ermittelt. Beide Probekörper, X1 und X2, liefern sehr gut reproduzierte Ergebnisse.

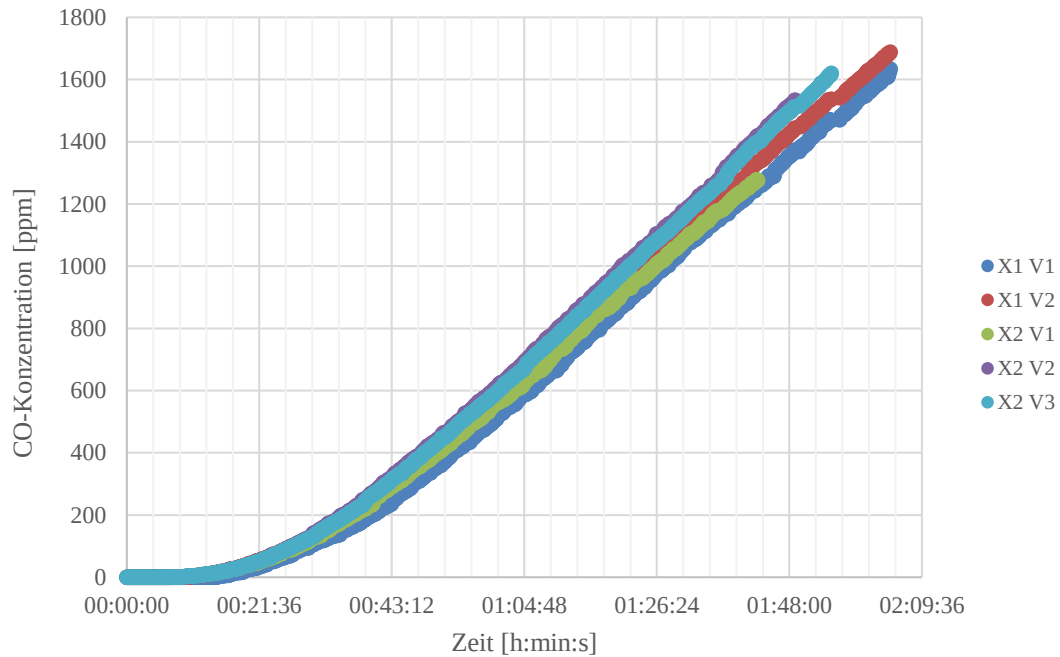


Abbildung 28: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Wandprobekörper mit flächiger Anschlussdichtung X1 und X2

Die Durchbruchzeit beträgt als Mittelwert 10 Minuten. In der Permeatkammer wird eine CO-Konzentration von 500 ppm nach 58 Minuten erreicht. Nach 87 Minuten ist die Konzentration im Mittel auf 1.000 ppm angestiegen. Aus den Messungen ergibt sich nach Formel (1) folgender Diffusionskoeffizient:

$$D_X = 5,084 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Abbildung 29 zeigt den gemittelten zeitlichen CO-Konzentrationsverlauf sowie die sich nach Formel (2) daraus ergebende Permeationsrate. Aus dem CO-Konzentrationsverlauf bestimmt sich mittels linearer Regression der Anstieg mit 0,25 ppm/s. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,9777.

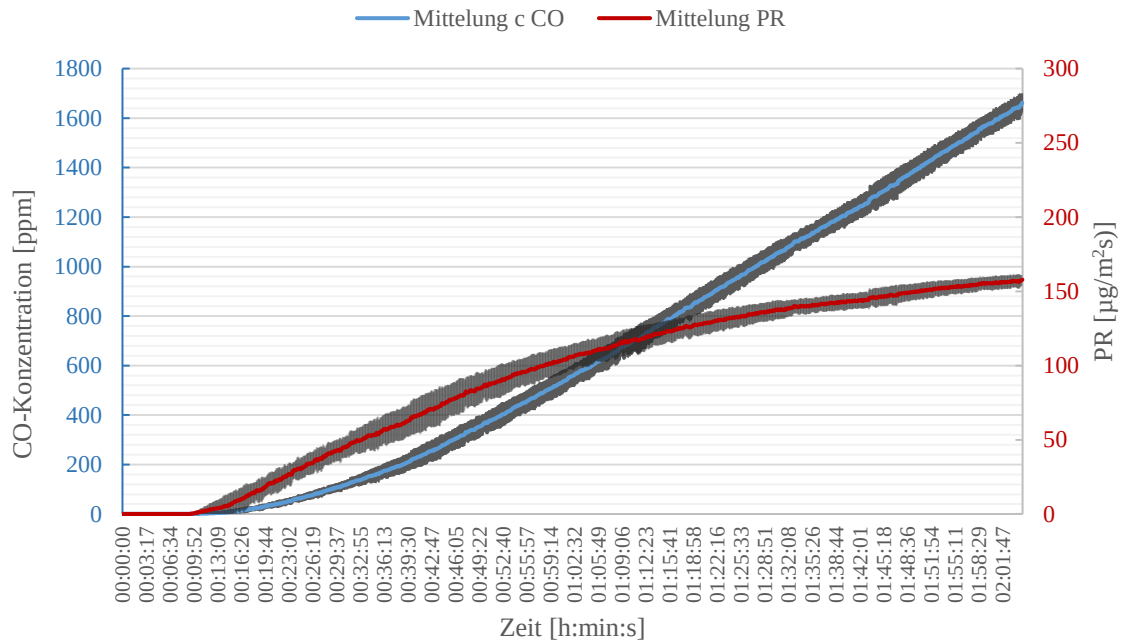


Abbildung 29: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Wandprobekörper mit flächiger Anschlussdichtung X1 und X2

4.3.5 Gleitender Deckenanschluss

Zum Vergleich steht das Permeationsverhalten von CO bei einem gleitenden Deckenanschluss zwischen Gipskartoneinfachständer- und Betonwand. Die Messergebnisse sind in Abbildung 30 visualisiert.

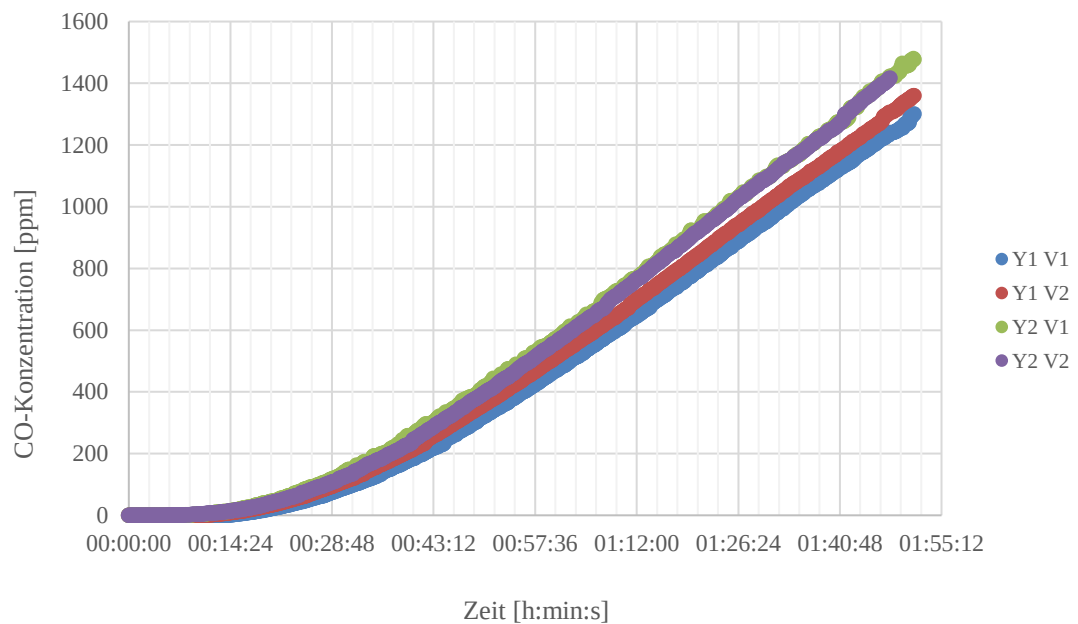


Abbildung 30: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Wandprobekörper mit gleitendem Deckenanschluss Y1 und Y2

Die Durchbruchzeit beträgt bei dieser Messreihe im Mittel 8 Minuten. Die Konzentration von 500 ppm wird nach 58 Minuten erreicht, 1.000 ppm stellen sich nach 89 Minuten ein. Daraus ergibt sich nach Formel (1) der Diffusionskoeffizient zu:

$$D_Y = 4,682 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Im Folgenden zeigt Abbildung 31 die mittlere CO-Konzentration sowie die sich daraus nach Formel (2) berechnete Permeationsrate.

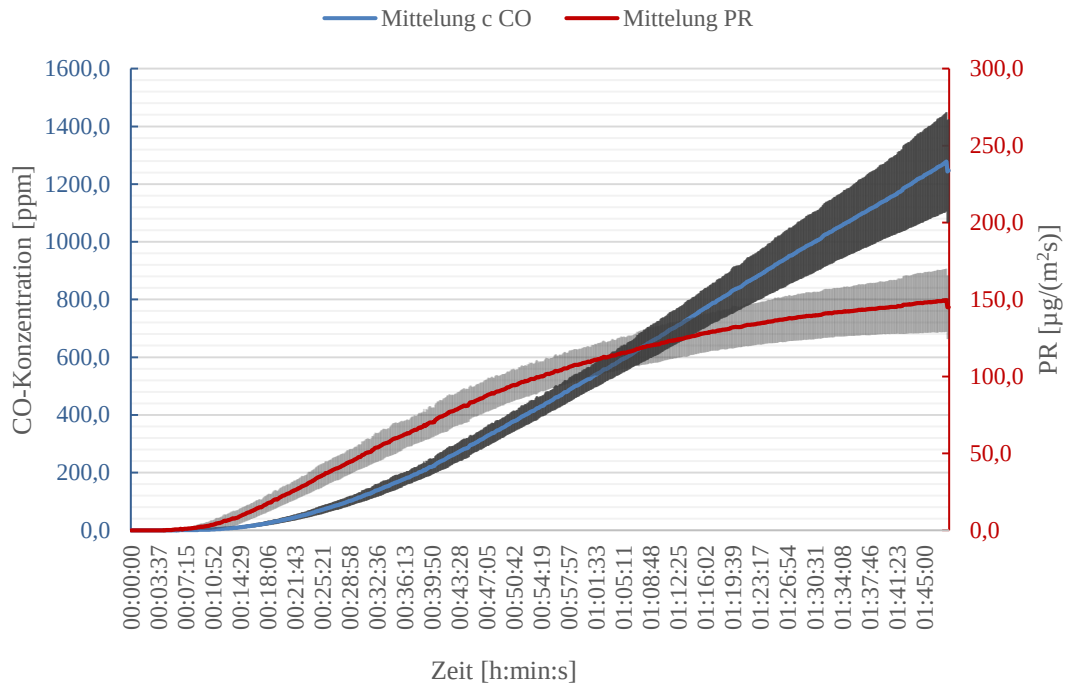


Abbildung 31: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Wandprobekörper mit gleitender Anschlussdichtung Y1 und Y2

Für die flächige Anschlussdichtung ergibt sich ein mittlerer CO-Anstieg von 0,22 ppm/s ($R^2=0,9736$). Beide Anschlüsse zeigen sich untereinander vergleichbar.

4.3.6 Vergleichende Betrachtung der Laborergebnisse

Nach der einzelnen Vorstellung der Ergebnisse sollen diese im Folgenden vergleichend betrachtet werden. Aus den Messungen und Grafiken wurden folgende Parameter für die Beurteilung des CO-Permeationsverhaltens berücksichtigt: Zunächst die Durchbruchzeit t_D , welche der Zeitspanne entspricht, wenn 1 ppm CO in der Permeatkammer detektiert wird. Dieser Wert allein ist nicht ausreichend aussagekräftig, um Rückschlüsse auf die CO-Permeation zu ziehen. Vereinfacht wird hier, wie eingangs beschrieben, von einem linearen Verlauf der CO-Konzentration ausgegangen, sprich von einem stationären Prozess. Das bietet bei langer Versuchsdauer sehr gute Annäherungen an die Realität. Allerdings ist der Prozess bei beginnender Diffusion instationär. In diesem Bereich liegt die gemessene Durchbruchzeit. Somit werden darüber hinaus zur Beurteilung die Zeiten ermittelt, bei denen 500 ppm (t_{500}) bzw. 1.000 ppm (t_{1000}) nach erfolgter Permeation nachgewiesen wurden. Dieser Konzentrationsbereich liegt im stationären und damit linearem Bereich der CO-Konzentrationsverläufe. Die Werte bieten vergleichend

eine gute Beurteilungsgrundlage und sind zeitgleich Grundlage für den Diffusionskoeffizienten D , der wiederum zur Beurteilung des Permeationsverhaltens beiträgt. Darüber hinaus lassen sich über eine lineare Regression mittlere CO-Konzentrationsanstiege bestimmen, wobei das Bestimmtheitsmaß R^2 einen Richtwert für die Anpassungsgüte der Regression liefert. Alle Werte sind als Überblick in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassung der aus den Messungen ermittelten Parameter (Durchbruchzeit t_D , Zeit zum Erreichen der Konzentrationen von 500 ppm t_{500} und 1.000 ppm t_{1000} sowie Diffusionskoeffizienten D , mittlerer CO-Anstieg und Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression)

Wandaufbau		t_D	t_{500}	t_{1000}	D	CO- Anstieg	R^2
		[min:s]	[min]	[min]	[m ² /s]	[ppm/s]	[-]
Gipskarton							
	GK	10:48	45	65	$8,194 \cdot 10^{-6}$	0,40	0,9955
Wandfarbe							
	W	07:52	47	68	$6,705 \cdot 10^{-6}$	0,29	0,9538
Fliese							
	FL1	15:29	74	108	$4,203 \cdot 10^{-6}$	0,20	0,9662
	FL2	13:20	108	165	$2,538 \cdot 10^{-6}$	0,12	0,9718
Tapete							
	T	07:09	41	58	$8,409 \cdot 10^{-6}$	0,33	0,9326
Polystyrolämmung							
	PS	14:00	122	191	$2,070 \cdot 10^{-6}$	0,10	0,9766
Holztafelwand							
	H	30:16	341	357	$1,150 \cdot 10^{-6}$	0,05	0,9735
Flächiger Wandanschluss							
	X	10:23	59	87	$5,0843 \cdot 10^{-6}$	0,25	0,9777
Gleitender Deckenanschluss							
	Y	08:19	58	89	$4,682 \cdot 10^{-6}$	0,22	0,9736

Alle gemittelten CO-Konzentrationsverläufe sind in Abbildung 32 gegenübergestellt.

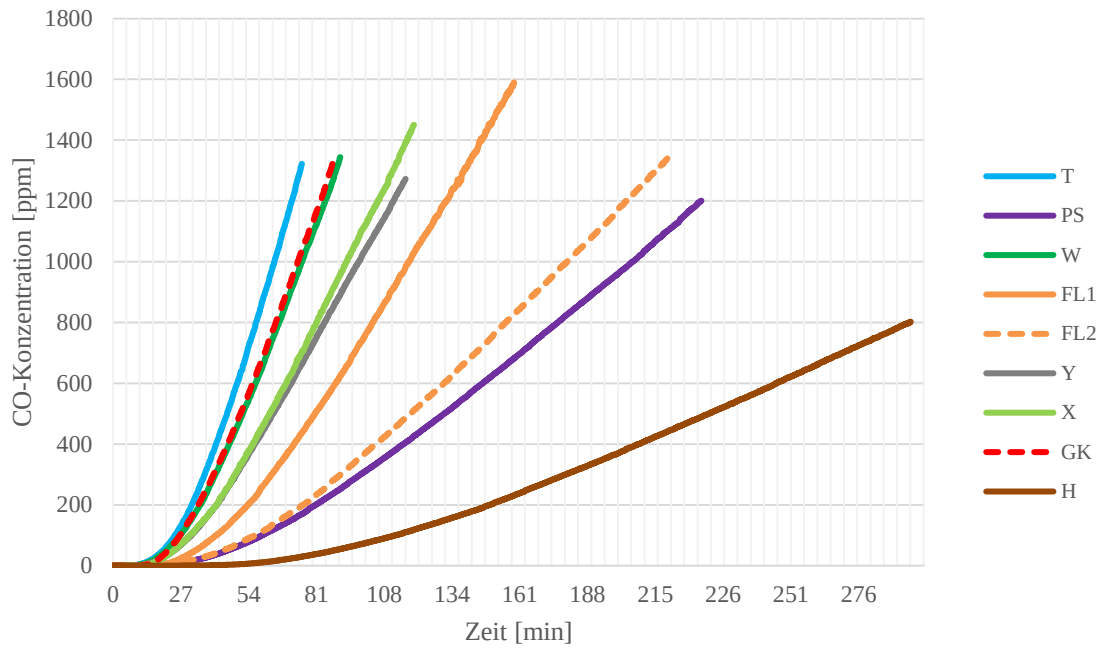


Abbildung 32: Gegenüberstellung aller mittleren CO-Konzentrationsverläufe der untersuchten Wandaufbauprobekörper

Weiterhin werden in Abbildung 33 alle gemittelten Permeationsraten dargestellt.

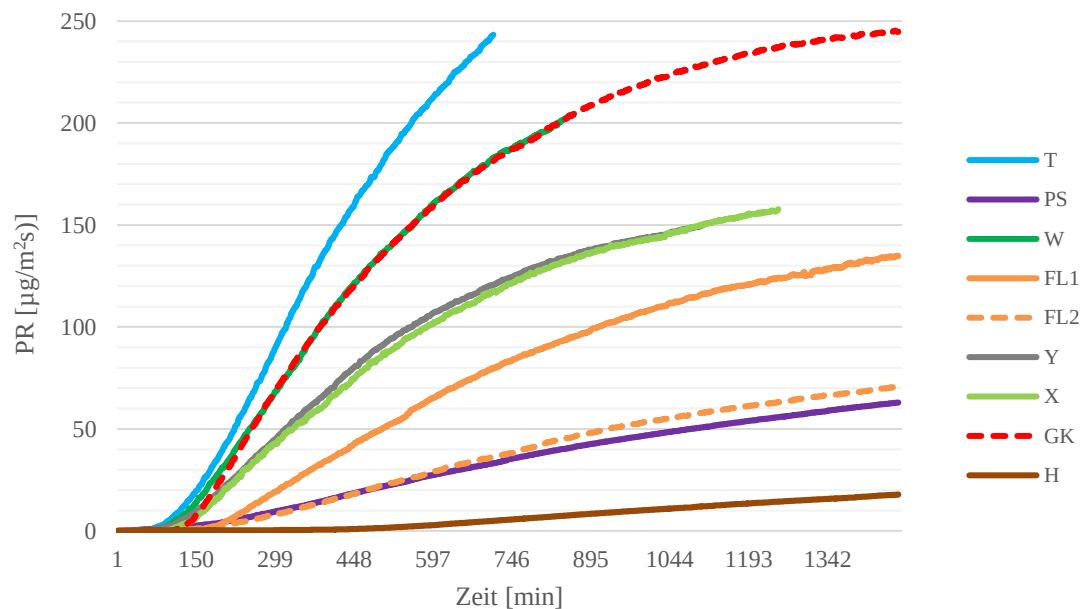


Abbildung 33: Gegenüberstellung aller mittleren Permeationsraten der untersuchten Wandaufbauprobekörper

Der Wandaufbau mit dem größten Widerstand gegenüber dem CO-Permeationsverhalten bietet die Holtafelwand. Hier werden neben der längsten Durchbruchzeit auch die längsten Zeiten erfasst, bis höhere CO-Mengen durch den Aufbau permeiert sind. Entsprechend lassen sich aus den Messwerten die geringsten Diffusionskoeffizienten berechnen. Der Unterschied, beispielsweise der Zeiten bis zum Erreichen einer Konzentration von 1.000 ppm, liegt im Vergleich zu allen anderen untersuchten Probewandkörpern bei Faktoren von zwei bis zehn.

Nicht ganz so deutliche unterschiedliche Ergebnisse liefern die Gipskartonwandaufbauten und deren Modifizierungen mit Wandfarbe und Tapete. Unter der reinen Betrachtung der Diffusionskoeffizienten scheinen die beiden Modifikationen mit Wandfarbe und Tapete einen Einfluss auf die CO-Durchlässigkeit zu haben. Jedoch zeigen die Konzentrationsverläufe (Abbildung 32) sowie die Permeationsraten (Abbildung 33) über die Versuchszeit, dass der Einfluss der Modifikationen sehr gering ausfällt und entsprechend keine ausreichenden Unterschiede in den Messdaten hervorgerufen werden, um eine quantitative oder qualitative Aussage ableiten zu können. Die Schwankungen in den Messdaten dieser drei Wandaufbauten liegen im Bereich von systematischen Abweichungen im Aufbau der Materialien der Probekörper sowie im Zusammenbau des Versuchstandes. Der Einfluss auf die CO-Permeation bei der Gipskartonwand durch die Modifikation mit Farbe und Tapete kann unter den experimentellen Randbedingungen messtechnisch nicht eindeutig erfasst und gleichgesetzt werden.

Es ergeben sich aber durchaus signifikante Unterschiede auf Grund der Modifizierungen mit Polystyrol-Dämmung und Fliesen. Nach Holz steht die Dämmung mit Polystyrol hinsichtlich des Diffusionskoeffizienten zur Beurteilung der CO-Durchlässigkeit an zweiter Stelle der untersuchten Wandkonstruktionen. Das spiegelt sich auch bei den in Tabelle 4 aufgeführten Zeiten sowie in Abbildung 32 und Abbildung 33 wieder. Interessant ist der signifikante Unterschied zwischen den beiden gefliesten Wandprobekörpern. Bei genauerer Betrachtung liegt der Unterschied der Probekörper im Verhältnis der Gesamtfugenfläche zur Gesamtfliessenfläche. Bei FL1 ist die Fugenfläche deutlich höher als bei FL2. Somit ist es naheliegend, dass hier schneller eine Permeation stattfindet, was durch den niedrigeren Diffusionskoeffizienten bestätigt wird, auch wenn sich die Durchbruchzeiten nur minimal voneinander unterscheiden. Die untersuchten Bauteilanschlüsse liegen unterhalb der reinen Gipskartonwand. Beide Wandanschlüsse im direkten Vergleich unterscheiden sich kaum voneinander. Unter Einbeziehung des Diffusionskoeffizienten liegen diese in ähnlicher Größenordnung wie der geflieste Wandprobekörper mit kleinen Fliesen und größerem Fugenanteil FL1.

Ergebnisse der Voruntersuchungen von [Scholz, 2020], dass CO deutlich schneller durch Gipskarton permeiert, als durch einen Holzaufbau, werden mit den Laboruntersuchungen bestätigt. Der wesentlich schnellere CO-Transport bei [Scholz, 2020] durch Gipskarton (140 ppm/min) im Vergleich zu den vorgestellten Laborversuchen (24 ppm/min) deutet auf Undichtigkeiten hin. Auch die, erwähnte fehlende Isolierung hin zur Umgebung, kann hier als maßgeblicher Einflussparameter verstanden werden. Dahingegen zeigen sich die Werte für eine Holzwand (1 ppm/min) [Scholz, 2020] im Vergleich zum hier vorgestellten Holzaufbau (siehe H1 und H2 mit 3 ppm/min) vergleichbar.

4.4 Großversuche

Auf Grundlage der Ergebnisse von [Seliger et al., 2009] und dem Scale-up-Laborversuchen unter 4.2 soll die Permeation von CO an realen Wänden, unter Berücksichtigung der Einflüsse von Bauteilanschlüssen, Rissen, Fugen und Materialalterung, überprüft werden. Dafür werden zwei Großversuche, die unterschiedliche Szenarien darstellen, in einem leerstehenden Mehrfamilienhaus durchgeführt. Messtechnisch und personell unterstützt wurden die Großversuche dankenswerterweise von der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.

4.4.1 Versuchsgebäude

Bei dem Versuchsgebäude handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus der Wohnungsbauserie 70 (WBS 70). Es wurde in Plattenbauweise aus Betonfertigteilen zu Zeiten der Deutschen Demokratischen Republik errichtet. Das Haus, mit insgesamt 3 Eingängen, ist mit Ein-bis Dreiraumwohneinheiten ausgestattet. Der Etagengrundriss ist in Abbildung 34 angegeben. Im ausgewählten mittleren Eingang befinden sich linkerhand Zwei- und rechterhand Dreiraumwohnungen. Für die Versuche wird die rechte Wohnung im 1. OG (Obergeschoss) genutzt. In der Nachbarwohnung sowie in den Wohnungen der Stockwerke darüber und darunter sollen zusätzlich die Konzentrationen in den direkt anliegenden Räumen erfasst werden. Zwei verschiedene Szenarien werden betrachtet, wobei alle Messstellen sowie die gezielte CO-Freisetzung an den gleichen Orten installiert sind.

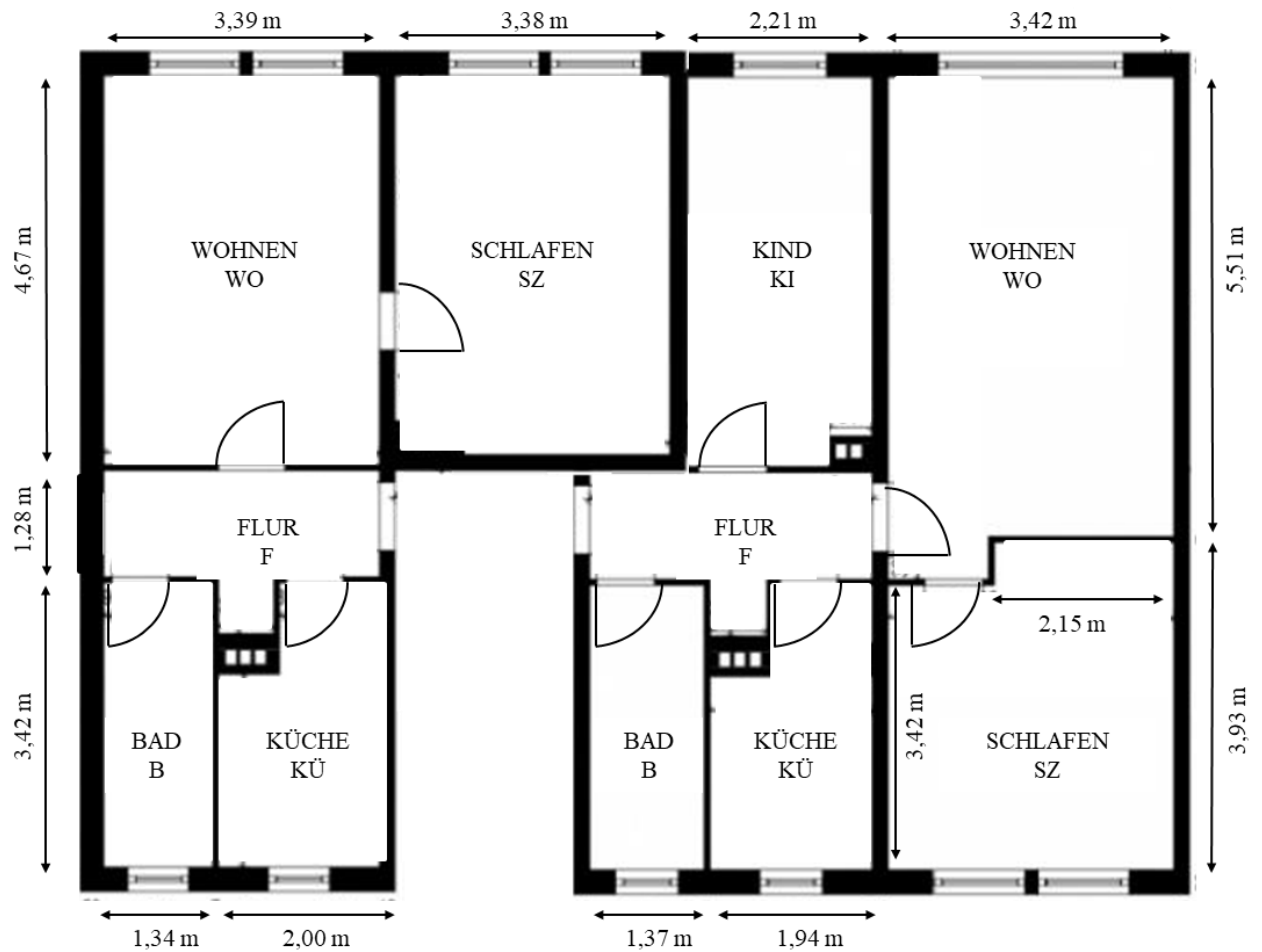


Abbildung 34: Etagengrundriss mit links: Zweiraumwohnung und rechts: Dreiraumwohnung im für den Großversuch genutzten Mehrfamilienhaus

Die Deckenhöhe beträgt 2,80 m. Aus den Maßen lassen sich die Volumina der für die Versuche relevanten Räume berechnen. Die Werte sind in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Raumlängenmaße und –volumina der versuchsrelevanten Räume, Raumhöhe: 2,80 m

Raum	Länge [m]	Breite [m]	Volumen [m³]
KI (alle 3 Etagen)	4,67	2,21	28,9
WO (1. OG, rechts)	5,51 (+ 0,44)	3,42 (+1,27)	54,3
SZ (1. OG, rechts)	3,42 (+ 0,51)	3,42 (+2,15)	35,8
F (1. OG, rechts)	3,31	1,28	11,9
SZ (1. OG, links)	4,67	3,38	44,2

Die Außenwände haben eine Dicke von 26 cm. Sie bestehen aus Normalbeton mit einer Kerndämmung. Die Innenwände sind aus 15 cm dickem Normalbeton [Mann, 2014], welche in Abbildung 34 durch dickere Linien gekennzeichnet sind. Trennwände, als dünne Linien in Abbildung 34 dargestellt, sind aus 6 cm dickem Normalbeton gefertigt. Eine 14 cm dicke Spannbetonplatte aus Vollbeton mit Stahlbewehrung dient als Zwischendecke zwischen den Geschossen. Die einzelnen Bauteile sind an den Knotenpunkten mit Gussbeton verbunden [Institut für Erhaltung und Modernisierung, 1997].

Trotz Realitätsbezug des Objekts müssen bauliche Veränderungen infolge von Auszug, Demontage und Vandalismus, hier der Vollständigkeit halber aufgeführt werden. Wasserführende Armaturen wurden in den Küchen und Bädern demontiert. Des Weiteren sind alle Heizungsrohre, die von Raum zu Raum verliefen, entfernt worden. Die zurückbleibenden Bohrungen in den Wänden wurden für die Versuche in den relevanten Räumen mit Montageschaum verschlossen. Darüber hinaus entsprechen Fenster und Türen aufgrund ihres Alters und längerem Leerstand nicht mehr aktuellen Standards hinsichtlich ihrer Dichtheit, so dass eine zusätzliche Abdichtung mit Kreppklebeband notwendig war. Auf gleiche Weise wird mit Löchern an Türen durch fehlende Klinken verfahren. Durch das Verkleben sind Fenster und Türen nicht vollkommen abgedichtet, was jedoch die Realität wiederum gut abbildet. Die folgende Abbildung 35 zeigt beispielhaft den Zustand im Versuchsbauwerk.

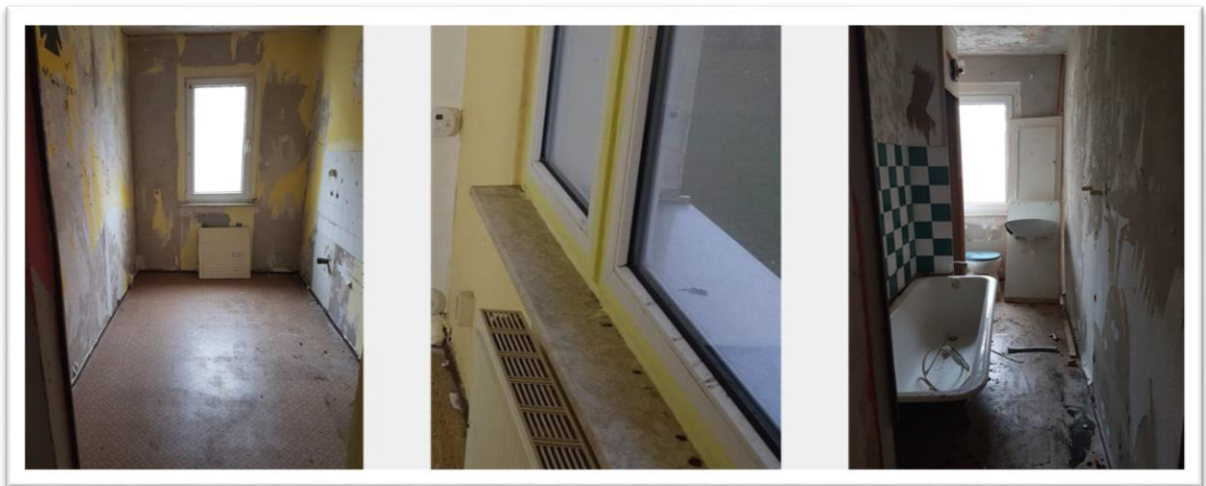


Abbildung 35: baulicher Zustand der Testwohnung, demontierte Rohre und Armaturen, Füllung von Löchern in Wänden mit Montageschaum, abgeklebte Fenster

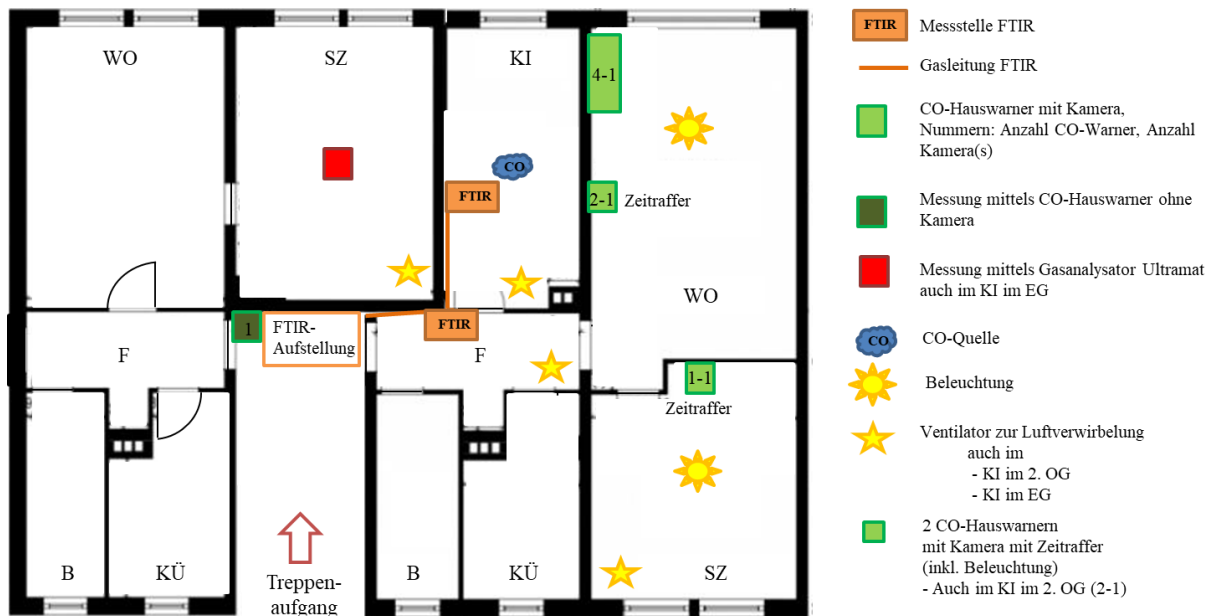
4.4.2 Messkonzept und Messtechnik

Für die Erfassung der unterschiedlichen CO-Konzentrationen und deren zeitliche Verläufe kommen unterschiedliche Gasmessgeräte zum Einsatz:

- zwei FTIR „Gasmeter DX400N FTIR Gas Analysator tragbar“,
- zwei Gasanalysatoren „Siemens Ultramat 22P“,
- zehn CO-Hauswarnmelder mit Displayanzeige „Modell Ei208iDW von EiElectronics“,
- ein CO-Personenwarner „ToxiRAE 3 CO 2000“ der Firma RAE Systems.

Unter 4.1 wurde bereits auf die FTIR-Messgeräte eingegangen. Deren Genauigkeit wird mit dem Gasanalysator Ultramat nicht im gleichen Maße erreicht. Der Analysator ist mit einem elektrochemischen Sensor ausgestattet. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 500 ppm CO und die Auflösung ist mit 0 bis 20 mA angegeben. Die CO-Konzentrationen werden ab 10 ppm erfasst, aber nur mit einer Auflösung von 5 ppm angezeigt. Auch die Hauswarnmelder sind mit einem elektrochemischen Sensor ausgestattet und zeichnen sich durch eine noch geringere Genauigkeit aus. Abhängig von der Konzentration blinken die entsprechend angezeigten Werte unterschiedlich schnell (ca. alle 5 bis 15 Sekunden). Die Daten sind hier nicht mittels Rechen-technik erfassbar, so dass die Datenaufnahme mit Hilfe von Kameras detektiert werden muss. Dabei kommen Zeitrafferfunktionen zum Einsatz. Es werden aber auch komplette Videoaufzeichnungen vorgenommen. Durch einen Zeitversatz zwischen Zeitrafferbild und Aufblinken des Hauswarners muss die etwas verspätete Detektion berücksichtigt werden. Dieser Zeitversatz wird im Vergleich zum erwarteten CO-Konzentrationsanstieg als vertretbar eingestuft. Auch der CO-Personenwarner „ToxiRAE 3 CO 2000“ der Firma RAE Systems ist mit einem elektrochemischen Sensor ausgestattet. Die Ansprechzeit liegt unterhalb von zwölf Sekunden. Die Werte werden in einem Bereich von 0 ppm bis 2000 ppm mit einer Auflösung von 1 ppm ausgegeben. Der aktuelle Messwert kann auf dem Display abgelesen werden [RAE Systems, 2020].

Der konzipierte Aufbau der Messstellen, der CO-Quelle und weiterer Hilfsmittel zur Datenerfassung sind in der folgenden Abbildung 36 dargestellt.



WO: Wohnzimmer SZ: Schlafzimmer KI: Kinderzimmer KÜ: Küche B: Bad F: Flur

Abbildung 36: Grundriss der kontaminierten Versuchswohnung im 1. OG sowie der Nachbarwohnung mit gekennzeichneten Messstellen, Ventilatoren und Beleuchtung

Für die später vorgestellten Szenarien findet sich das Gros der Ausrüstung in der rechten Wohnung im 1. OG (Versuchswohnung). Als Raum für die CO-Quelle ist das Kinderzimmer (KI) vorgesehen. Hier werden ein Ventilator und eine FTIR-Entnahmestelle zur Messung der CO-Ausgangskonzentration installiert. Nach Abdichtung der Tür, wird im direkten Anschluss, im Flur ebenfalls eine FTIR-Messstelle positioniert und durch einen Ventilator unterstützt. Mittels einer gasdichten Pumpe wird Luft hier angesaugt und zu den im Hausflur aufgestellten FTIR-Geräten zur Analyse befördert. Um einen möglichen CO-Austritt aus der abgedichteten Wohnung oder dem FTIR-Analysator zu erfassen, wird hier zusätzlich ein CO-Personenwarner bereitgestellt. Beide FTIR-Entnahmestellen befinden sich in einer Höhe von 1,20 m. Damit sind die Räume, wo der höchste und schnellste Anstieg der Gesamt-CO-Konzentration erwartet wird, mit den sensibelsten der vorhandenen Messgeräte ausgestattet.

Das Schlafzimmer der Nachbarwohnung, welches direkt an den Quellraum grenzt, ist mit einem Ventilator und dem Gasanalysator Ultramat 22P ausgestattet, da hier ein geringer Anstieg der CO-Konzentration erwartet wird und gleichzeitig eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet werden muss.

Die Gaswarnmessgeräte, die eigentlich als Hauswarnmelder dienen, werden in mehreren Zimmern und an unterschiedlichen Messpunkten positioniert. Im WO werden sechs Hauswarnmelder, 10 cm und 60 cm über dem Fußboden, entlang der Wand zum KI (Quellraum) installiert. Die Höhe von 60 cm entspricht dabei einer im Bett liegenden Person. Wie in Abbildung 35 zu erkennen, werden davon vier Melder in der Ecke am Fenster (Bezeichnung CO-Hauswarner 4-1; Abbildung 36) und zwei mittig (Bezeichnung CO Hauswarner 2-1, Abbildung 36) angebracht. Die bodennahe Befestigung soll den möglichen Einfluss der Bauteilanschlüsse an den Übergängen Wand-Fußboden sowie Wand-Außenwand detektieren. Die vier Melder in der Ecke werden durch eine Brandraumkamera permanent überwacht und aufgezeichnet. Die beiden Melder in der Mitte werden von einer Kamera im Zeitraffermodus aufgenommen. Alle zehn Sekunden wird eine Aufnahme erstellt. Je nach erfasster CO-Konzentration und damit der Anzeigefrequenz des Messwerts, muss hier eine Zeitdifferenz bis zur Aufnahme des ersten abzulesenden Messwerts akzeptiert werden.

Darüber hinaus wird das SZ der Versuchswohnung mit CO-Warnern ausgerüstet, deren Datenerhebung ebenfalls durch entsprechende Kameratechnik sichergestellt wird. Hierfür wird ebenfalls mit einem Hauswarnmelder, auf einer Höhe von 60 cm, die CO-Konzentration im SZ der Testwohnung an der Wand zum WO erfasst.

Für die Untersuchung der CO Permeation durch die Stockwerke sind in den direkt über und unter dem Quellraum liegenden Kinderzimmern im Erdgeschoss (EG) und im 3. OG CO-Hauswarner auf gleiche Weise installiert. Deren Messwerte werden bei Kontrollgängen manuell erfasst.

In den meisten Messräumen werden kleine Ventilatoren betrieben, um eine geringe Luftbewegung zur Durchmischung im Raum zu gewährleisten. Dies simuliert in einem realen Wohngebäude menschliche Bewegungen sowie die Konvektion der Heizungsluft. Im WO wird darauf verzichtet, um Permeationseffekte an den Bauteilanschlüssen nicht zu beeinflussen.

Aus Sicherheitsgründen darf das Gebäude bei laufenden Versuchen nur von geeignetem Personal unter Atemschutz betreten werden, die zusätzlich mit einem CO-Personenwarner ausgestattet sind.

Zu guter Letzt werden in den Untersuchungsräumen die Temperaturen während der Versuche erfasst. Der Einfluss der Temperatur auf den Diffusionskoeffizienten soll somit bei der späteren Auswertung Berücksichtigung finden. So soll ein Vergleich zwischen den Daten der Großversuche und den Labordaten ermöglicht werden.

4.4.3 Szenarien

Für die Großversuche werden zwei Szenarien betrachtet. Die CO-Quelle befindet sich in beiden Fällen im KI der rechten Wohnung im 1. OG (Quellraum). Die Szenarien, deren Hintergrund sowie der zeitliche Ablauf der Versuche werden in den beiden nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

4.4.3.1 Szenario 1 – Grillabend

Im ersten Szenario wird von einem verregneten Grillabend ausgegangen. Die Personen gehen 50 Minuten nach dem Anzünden des Grills in die Wohnung und nehmen den Grill, samt Glut und Resthitze, mit ins Haus. Die Ausgangsmasse der Grillbriketts beträgt ca. 1,2 kg. Der Grill wird in das Kinderzimmer, im Szenario als Esszimmer genutzt, gestellt. In Anlehnung an vorherige Forschungsprojekte [Seliger et al., 2019] wird mit einer CO-Konzentration von etwas weniger als 4.000 ppm gerechnet. Hier ergaben 1,2 kg Grillbriketts, angezündet in einem Container ($V = 34,56 \text{ m}^3$), eine Konzentration von ca. 4000 ppm an CO. Nach Tabelle 1 verursacht diese Konzentration im Quellraum sehr schnell Kopfschmerzen, Übelkeit, mögliche Krampfanfälle sowie den Tod in unter 30 Minuten.

50 Minuten nach Anzünden der Grillbriketts wurde der Grill im Quellraum positioniert. Die Briketts lagen glühend und bereits mit Asche bedeckt vor. Nach weiteren drei Minuten waren die Zimmer- und die Wohnungstür verschlossen und mittels Kreppklebeband abgedichtet.

Die Hauswarnmelder wurden unter Atemschutz nach 200 und 392 Minuten im nach oben an den Quellraum grenzenden Zimmer abgelesen. Die Wohnungstür der Versuchswohnung wurde nach 390 Minuten mittels Personenwarner auf Undichtigkeit überprüft. Dabei wurde aufgrund eines Lecks eine CO-Konzentration von 81 ppm detektiert. Nach 492 Minuten wurde der Grill aus der Wohnung entfernt. Die Briketts waren komplett ausgeglüht und zu Asche zerfallen. Im Anschluss wurden im Gebäude die Fenster geöffnet. Nach insgesamt 501 Minuten Versuchszeit wurde, von der Hauseingangstür ausgehend, mit einer Überdruckbelüftung begonnen und diese nach 13 Minuten wieder beendet.

Daraufhin erfolgte eine Überprüfung aller Räume mittels Personenwarner auf CO. Die CO-Konzentration betrug dabei überall 0 ppm. Die Räume wurden danach erneut verschlossen und weiterhin hinsichtlich ihrer CO-Konzentrationen messtechnisch überwacht. Nach weiteren 30 Minuten wurde der Versuch beendet und alle Räume endgültig belüftet. Der zeitliche Ablauf des Versuchs ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Zeitlicher Verlauf Szenario 1 - Grillabend

Zeitpunkt [min]	Handlung
-50	Grillbriketts entzünden
0	Grill in Kinderzimmer 1. OG rechts bringen
3	Kinderzimmer 1. OG rechts, Wohnungstür verschlossen
200	Kontrolle Hauswarnmelder Kinderzimmer 2. OG
390	Überprüfung Wohnungstür der kontaminierten Wohnung auf Undichtigkeiten
392	Kontrolle Hauswarnmelder Kinderzimmer 2. OG
492	Entfernen Grill aus Wohnung, Lüften der Räume beginnt
501	Überdruckbelüftung von Hauseingangstür ausgehend
514	Überdruckbelüftung beendet, Räume verschließen
544	Versuch beendet, endgültiges Lüften

4.4.3.2 Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter

Das zweite Szenario geht von einer Zwei-Mann-Wohnungsgemeinschaft aus. Einer der Bewohner erzeugt, in suizidaler Absicht, CO, zum Beispiel durch eine chemische Reaktion. Für die Umsetzung wird das Gas aus zwei 10 Liter-Druckgasbehältern mit einer CO-Konzentration von 20.000 ppm CO in Stickstoff und einem Anfangsdruck von 200 bar im Quellraum freigesetzt. Damit wird eine CO-Konzentration von ca. 2.000 ppm angestrebt. Laut Tabelle 1 kommt es bei dieser Konzentration bei einer Person zügig zu Kopfschmerzen und Schwindel. Des Weiteren ist mit Übelkeit nach ca. 15 Minuten und dem Tod nach ungefähr einer Stunde zu rechnen.

Zu Versuchsbeginn wurden beide Druckgasbehälter unter Atemschutz im Quellraum geöffnet und vollständig entleert. Die Zimmertür wurde verschlossen. Es ist davon auszugehen, dass beim Verlassen des Raums CO in den Flur gelangte. Nach einer Versuchszeit von 341 Minuten wurden die Hauswarnmelder im Zimmer direkt oberhalb des Quellraums, unter Atemschutz, abgelesen. Nach 495 Minuten wurden die Räume durch Öffnen der Fenster und Türen für neun Minuten gelüftet. Im Anschluss wurde die Überdruckbelüftung, ausgehend von der Hauseingangstür, eingeleitet und für 15 Minuten aufrechterhalten. Daraufhin wurde in allen Räumen, mittels Personenwarner, die CO-Konzentration überprüft, bevor im Anschluss der Quellraum wieder verschlossen und die CO-Konzentration messtechnisch weiter erfasst wurde. Nach insgesamt 554 Minuten war der Versuch beendet und das gesamte Gebäude wurde gelüftet. Der zeitliche Ablauf des Versuchs ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Zeitlicher Verlauf der Messung zu Szenario 2 – Suizid/Druckgasbehälter

Zeitpunkt [min]	Handlung
0	Ablassen Druckgasbehälter
341	Kontrolle Hauswarnmelder Kinderzimmer 2. OG
495	Lüften der Räume beginnt
504	Überdruckbelüftung von Hauseingangstür ausgehend
519	Überdruckbelüftung beendet
524	Räume verschlossen
554	Versuch beendet, endgültiges Lüften

4.4.4 Messergebnisse, verarbeitete Daten und Diskussion der Großversuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse für beide Szenarien vorgestellt. Aufgrund technischer Probleme konnten nicht alle Messstellen im vollen Umfang die Datenerhebung sicherstellen. Alle auswertbaren Messergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

4.4.4.1 Einflussfaktor Temperatur

Die Temperaturüberwachungen der Messräume zeigen ein einheitliches Bild. Die Temperaturschwankung liegt in fast allen Räumen bei weniger als einem Kelvin. Die Temperaturen entsprechen weitestgehend, in beiden untersuchten Szenarien, den Außentemperaturen von ca. 7 °C (Szenario 1 - Grillabend) und ca. 4 °C (Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter). Einzig der Quellraum erwärmte sich im Szenario Grill auf ca. 8,2 °C beim Ausglühen des Grills. Der Raum kühlte sich aber im Laufe des Versuchs wieder auf die ursprünglichen 7 °C ab.

Mit der Formel (3) lässt sich der Einfluss von Temperaturschwankungen auf den Diffusionskoeffizienten bestimmen. Diese Abschätzung ist notwendig, um einen Vergleich mit den, zuvor erfassten, Laborwerten zu ermöglichen. Notwendig dafür ist die Normierung der Werte auf 0 °C. Mit der Ausgangstemperatur $T_1 = 273,15 \text{ K}$ und der erhöhten Temperatur von $T_2 = 280,15 \text{ K}$ bzw. $277,15 \text{ K}$ ergeben sich kleine Abweichungen in Größenbereichen von 3,8 % bzw. 2,2 % bei den Diffusionskoeffizienten. Entsprechend ergeben sich, unter Vernachlässigung des Temperatureinflusses, bei der Betrachtung der Diffusionskoeffizienten aus den Labor- und Großversuchen, keine relevanten Abweichungen beim Vergleich der Messergebnisse. Entsprechend wird im Folgenden auf eine Temperaturanpassung verzichtet.

4.4.4.2 Szenario 1 – Grillabend

Zunächst wird der durch das Verglühen der Grillbriketts entstehende CO-Konzentrationsanstieg im Quellraum in Abbildung 37 vorgestellt. Hierüber ist die Ausgangskonzentration zu jeder Zeit des Versuchs definiert und dient als Grundlage zur Berechnung der Diffusionskoeffizienten.

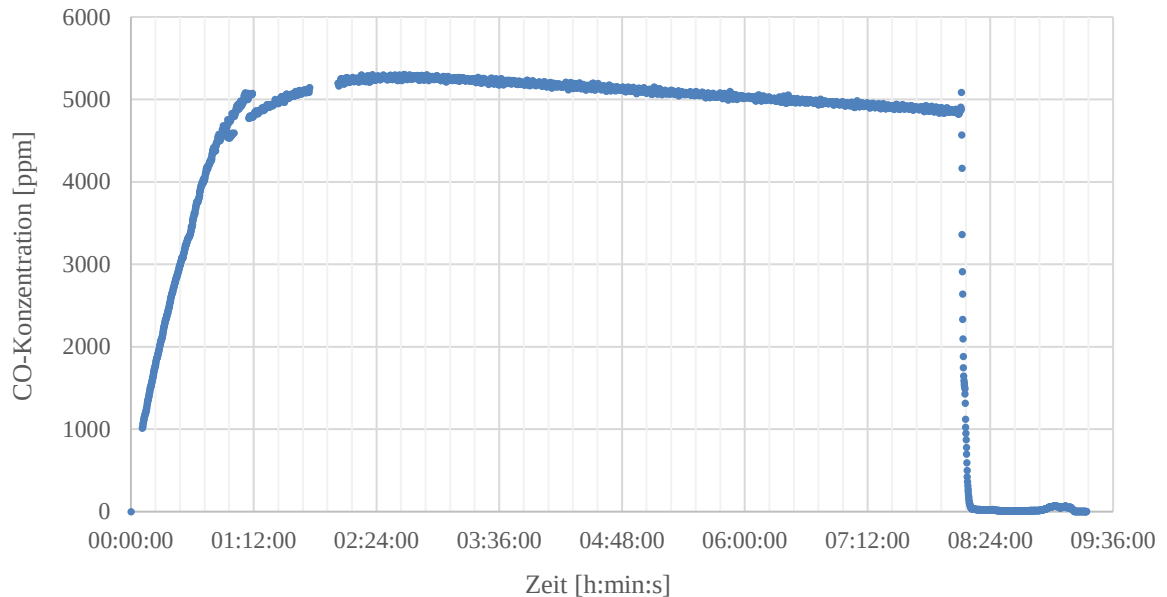


Abbildung 37: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR im Quellraum (KI, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 1 - Grillabend

Innerhalb der ersten Stunde ist ein schneller Anstieg der CO-Konzentration zu erkennen. Der Anstieg setzt sich bis zu einer Maximalkonzentration von 5.302 ppm CO fort. Im Anschluss wird ein Abfall der Konzentration mit ca. 78 ppm/h verzeichnet. Nach acht Stunden und zwölf Minuten ist ein starker Abfall der Konzentration aufgrund der Lüftungsmaßnahmen zu erkennen. Nach der Lüftungszeit von ungefähr 30 Minuten und dem Wiederverschließen des Quellraums, lässt sich erneut ein Anstieg der CO-Konzentration erkennen. Da hier die CO-Quelle bereits aus dem wiederverschlossenen Raum entfernt wurde, ist von einem Wiederaustritt des Gases aus der Gebäudestruktur zurück in den Raum auszugehen. Anschließendes Lüften führt zu einer erneuten CO-Konzentrationsabsenkung. Die CO-Konzentrationsverläufe der angrenzenden Räume werden im Folgenden vorgestellt. Der, ebenfalls mittels FTIR, erfasste Verlauf für den angrenzenden Flur ist in Abbildung 38 dargestellt.

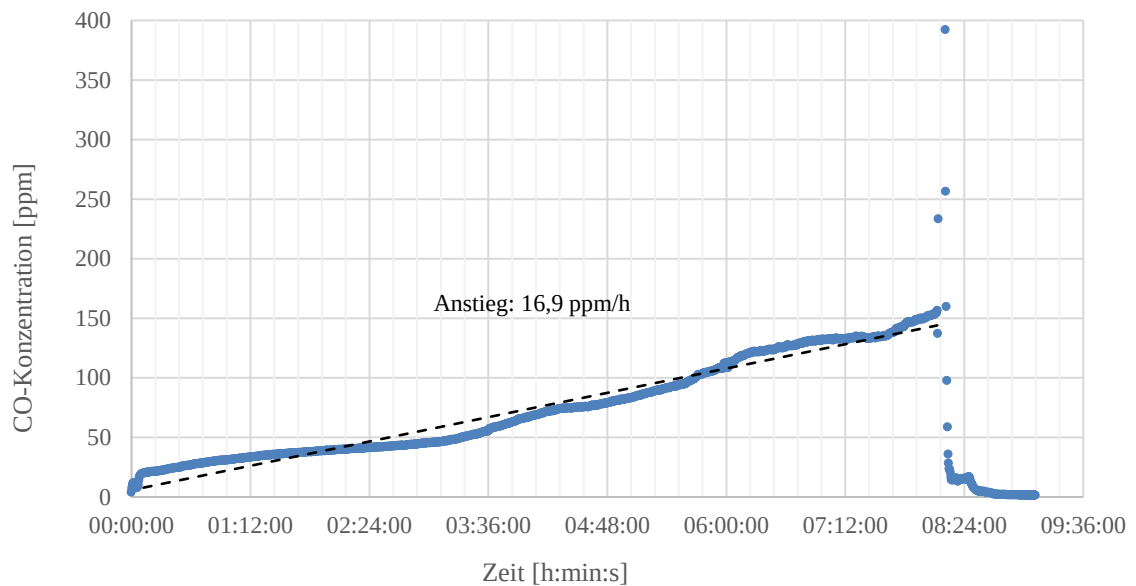


Abbildung 38: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR (Flur, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 1 - Grillabend

Im Flur ist gleich zu Beginn der Messung auffällig, dass die CO-Konzentration schnell auf ungefähr 20 ppm ansteigt. Die Ursache hierfür ist die Positionierung des noch glühenden Grills im Quellraum, wobei dieser durch den Flur, vorbei an der betrachteten Messstelle, geführt werden muss. Dieser Vorgang, inklusive Wiederabdichtung der Tür dauerte laut Tabelle 6 drei Minuten. Danach steigt die Konzentration kontinuierlich mit einer mittleren Rate von 16,9 ppm pro Stunde an. Nach acht Stunden und zwölf Minuten wird der Feuerwehreinsatz simuliert, in dem die Türen und Fenster geöffnet werden, was anhand des sprunghaften und kurzzeitigen Anstiegs auf bis zu 4.000 ppm im Flur zu erkennen ist.

Der Flur ist durch eine Wand und eine Tür vom Quellraum getrennt. Die für die Permeation vorhandenen Flächen vom Quellraum zum Flur setzen sich zusammen aus den mit Kreppklebeband abgedichteten Türspalten, der Fläche des Türblatts und der Wandfläche. Letztere macht im Verhältnis zur Tür mit Klebeband den größten Anteil aus, bezogen auf die Gesamtfläche.

Der Raum rechts neben dem Quellraum (WO, 1. OG) war mit vier Hauswarnmeldern ausgestattet, die mit Kameras überwacht wurden. Im Nachgang konnten nur die Werte eines Warnmelders (Bezeichnung 4-1; Abbildung 36; 10 cm über dem Boden), nach Auswertung der kontinuierlichen Videoaufzeichnung, verwertet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

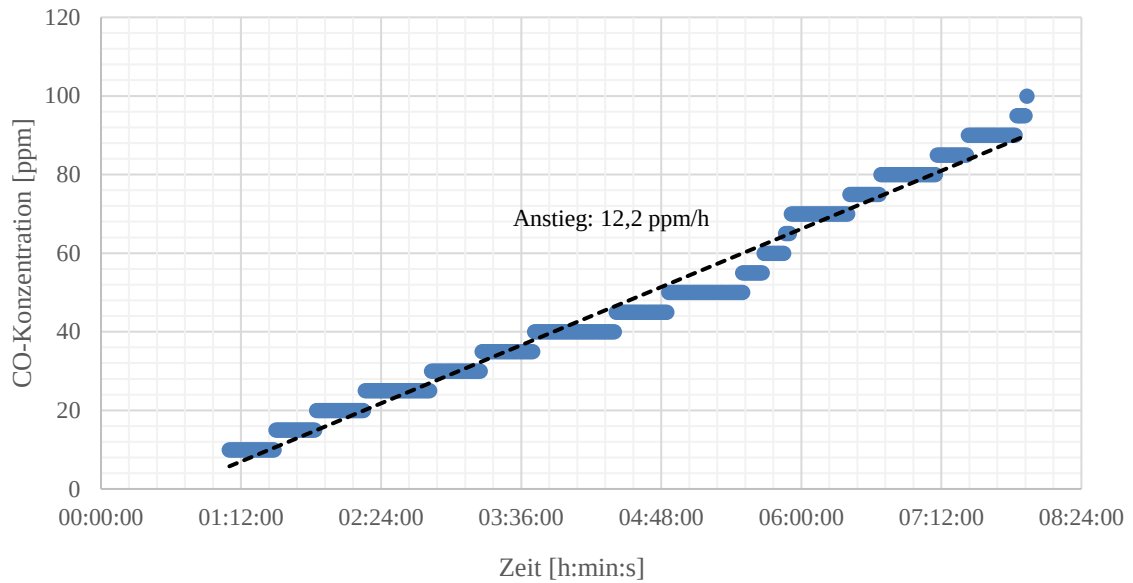


Abbildung 39: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels Hauswarnmelder (WO, 1. OG, rechts) beim Szenario 1 – Grillabend; Melder 10 cm über dem Boden, direkt an der Wand

Die gestückelte Darstellung ergibt sich aus den Zeitdifferenzen zwischen der Erfassung der einzelnen Konzentrationswerte. Alle zehn bis fünfzehn Sekunden wurde im Schnitt ein Messwert ausgegeben. Nichtsdestotrotz lässt sich der kontinuierliche CO-Konzentrationsanstieg ermitteln. Durch eine lineare Regression ergibt sich ein Konzentrationsanstieg von 12,2 ppm/h. Das Bestimmtheitsmaß der Regression von 0,978 zeigt den Fehler der beschriebenen scheinbaren Konzentrations sprünge als vernachlässigbar.

Die, ebenfalls mittels Hauswarnmelder erfassten, CO-Konzentrationswerte für das Kinderzimmer in der Etage über dem Quellraum sind in Abbildung 40 angegeben.

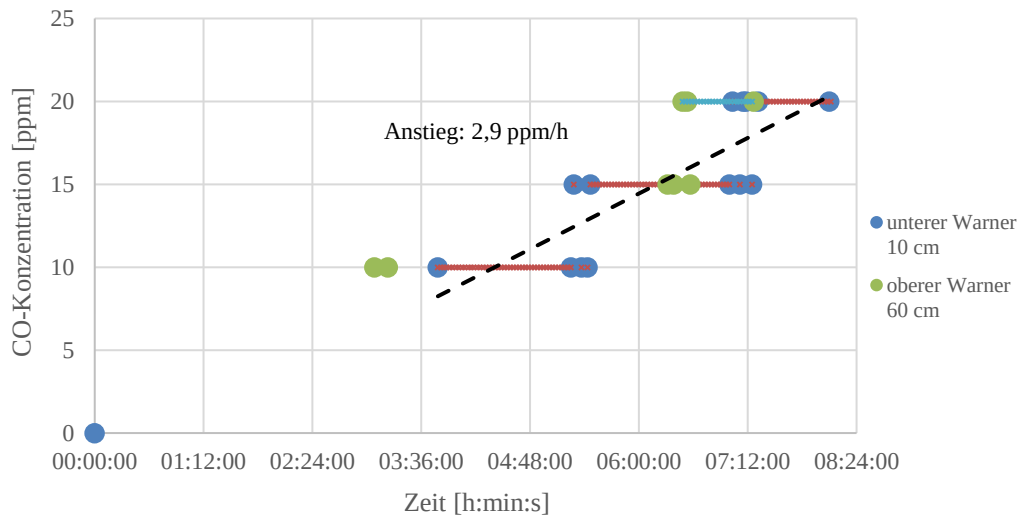


Abbildung 40: CO-Konzentrationsverlauf im Zimmer oberhalb des Quellraums (KI, 2.OG, rechts) bei Szenario 1 - Grillabend

Im KI oberhalb des Quellraums sind Konzentrationen zwischen 10 ppm und 20 ppm gemessen worden. Die Aufzeichnungen der Konzentrationsänderungen mittels Videoüberwachung haben hier besonders ihre Tücken gezeigt. Insbesondere durch Verlust des Fokus der Kamera und sich verändernde Lichteinstrahlungen während des laufenden Versuchs, konnten teilweise Daten nachträglich nicht vom Videomaterial entnommen werden. So liegen für die Zeit zwischen 03:15:00 und 06:19:00 sowie ab 07:16:00 keine Daten für den oberen Warner vor. Dennoch kann über eine lineare Regression ein mittlerer CO-Konzentrationsanstieg von 2,9 ppm/h ermittelt werden. Das Bestimmtheitsmaß ist mit 0,875 zwar geringer als im vorher betrachteten Raum, aber in Anbetracht der fehlenden Werte und auch der deutlich geringeren Konzentrationen sowie den großen Zeitdifferenzen zwischen den Messungen, ist das Ergebnis der linearen Regression akzeptabel.

Im SZ der Versuchswohnung wurden während der gesamten Versuchszeit keine Werte für die CO-Konzentration von dem installierten Hauswarnmelder angezeigt. Somit kann von einer permanenten CO-Konzentration von unter 10 ppm ausgegangen werden.

Mit Hilfe der gemessenen Ausgangskonzentration im Quellraum und den resultierenden Konzentrationen in den anliegenden Räumen lassen sich die Permeationsraten (siehe Abbildung 41) und die Diffusionskoeffizienten (siehe abend

Tabelle 8) für die drei unterschiedlichen Durchtrittsflächen zu den Kontrollräumen berechnen.

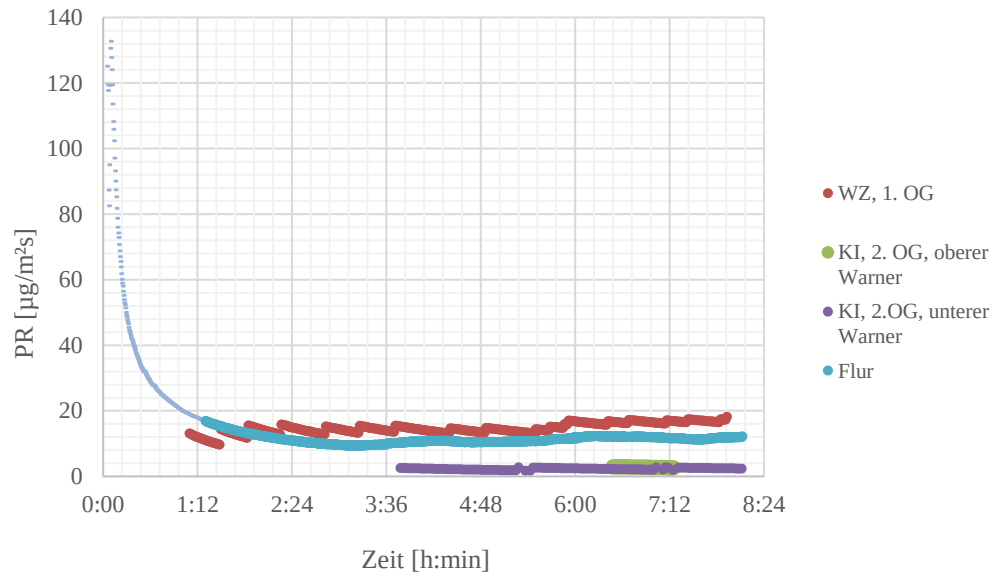


Abbildung 41: CO-Permeationsraten durch verschiedene Wände im Szenario 1 –Grillabend

Tabelle 8: Bauteildicken, Permeationsflächen, Konzentrationsanstiege und Diffusionskoeffizienten für die Räume bzw. Wände bei Szenario 1 - Grillabend

Wand/Decke zwischen Quellraum und	L [cm]	A [m²]	D [m²/s]	CO- Anstieg [ppm/h]	R² [-]
WO 1. OG, rechts	15	13,1	$2,2 \cdot 10^{-7}$	12,2	0,9780
Flur 1. OG, rechts	6	6,2	$6,1 \cdot 10^{-8}$	16,9	0,9626
KI 2. OG, rechts	14	10,3	$2,7 \cdot 10^{-8}$	2,9	0,8750

Der massive Anstieg und anschließende Abfall der Permeationsrate für die Trennwand zum Flur zu Beginn ist der Türöffnung und Positionierung des Grills und dem damit verbundenen Konzentrationsanstieg geschuldet. Bei diesem Kurvenabschnitt handelt es sich nicht um einen Permeationsvorgang durch Wand oder Tür und ist in der Grafik durch eine andere Farbgebung gekennzeichnet. Die Permeationsprozesse beginnen, wie oben beschrieben, nach ungefähr drei Minuten. Ungefähr zwei Stunden nach dem eigentlichen Versuchsbeginn stellt sich eine nahezu konstante Permeationsrate im Flur ein.

Aufgrund der sich zügig anreichernden CO-Konzentration im Flur kann die höhere Permeationsrate hin zum WO einerseits erklärt werden. Zum WO gerichtet findet nicht nur die Permeation durch eine 15 cm dicke Betonwand statt, sondern zusätzlich auch ausgehend vom Flur. Des Weiteren ist die beaufschlagte Fläche, also die Wand, zwischen WO und KI deutlich größer als die Wand zwischen KI und Flur. Auch der mit Bauschaum verschlossene Heizungsrohrschaft zwischen Quellraum und WO hat in diesem Zusammenhang einen Einfluss.

Die Permeation ins KI des 2. OG (direkt oberhalb des Quellraums) ist gering, unter anderem wegen des stets gut gelüfteten Hausflurs und fehlender direkter Bohrungen, die zusätzlich hätten abgedichtet werden müssen. Hier ergibt sich eine Spanne der Permeationsrate über die komplette Versuchszeit von 2 - 4 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$. Die Permeationsraten liegen damit unterhalb der in [Seliger et al., 2019] dargestellten Laboruntersuchungen.

Die Diffusionskoeffizienten für die drei Wandarten und damit unterschiedlichen Betondicken liegen im Bereich $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Sie zeigen sich damit geringer als bei den Labormessungen. [Seliger et al., 2019] Hier lagen die Größenordnungen bei $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Der entscheidende Unterschied zwischen den Laborwerten und den ermittelten Daten des Großversuchs liegt an der Permeation des CO in alle Richtungen, das heißt die Weiterpermeation in andere Räume bzw. im Falle einer Außenwand, an die Umgebung. Während bei den Laborversuchen die Apparatur so konzipiert war, dass die Permeation nur durch einen definierten Wandaufbau mit definierter Fläche stattfindet, kann das auf ein reales Gebäude nicht vollständig übertragen werden. Hier stehen alle Wände / Decken für die CO-Permeation zur Verfügung. Darüber hinaus beeinflussen Bohrungen und Spalten, auch wenn diese verschlossen werden, ebenfalls das Permeationsgeschehen. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der Ausgangskonzentration im Quellraum, die bei genauerer Betrachtung sich ebenfalls auf das Geschehen auswirkt. Diese zweite Stufe der Permeationsvorgänge findet sehr langsam statt. Das ist durch Berechnung des Konzentrationsabfalls berücksichtigt worden (Abbildung 37).

4.4.4.3 Szenario 2 - Suizid mit Druckgasbehälter

Der Konzentrationsverlauf für den Quellraum des zweiten Großversuchs ist in Abbildung 42 dargestellt.

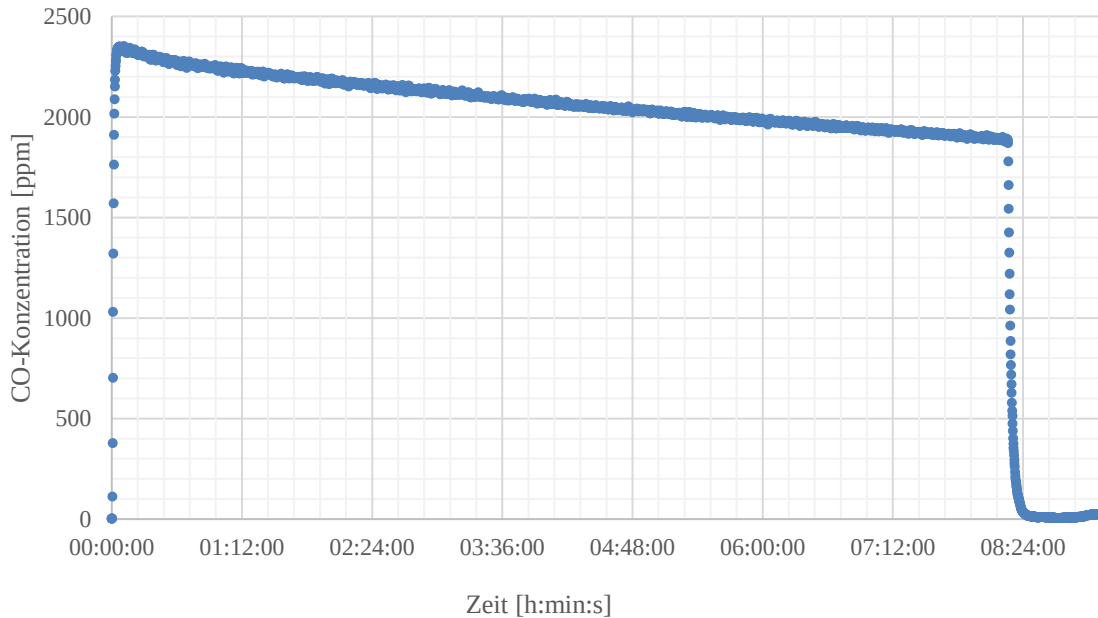


Abbildung 42: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR im Quellraum (KI, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter

Nach Öffnung der Druckgasbehälter lässt sich ein sehr schneller Anstieg der CO-Konzentration im Quellraum verzeichnen. Die maximale Konzentration von 2.350 ppm CO wird bereits nach vier Minuten gemessen. Im Gegensatz zum Szenario 1 wird hier im Raum kein weiteres CO produziert und entsprechend ist im weiteren Verlauf ein stetiger Abfall der CO-Konzentration zu erkennen, der auf Permeationsprozesse zurückgeführt werden kann. Die Konzentration sinkt mit 0,8 ppm/min bzw. 50,4 ppm/h.

Nach ca. 8 Stunden und 15 Minuten wird das Experiment beendet, die Türen und Fenster geöffnet sowie die Druckbelüftung des Gebäudes eingeleitet. Das führt zu einem raschen Abfall der CO-Konzentration. Nach erneutem Verschließen der Räume zeigt sich auch in diesem Versuch ein erneuter Anstieg der CO-Konzentration, was auf ausströmendes, noch in den Wänden vorhandenes CO hinweist.

Der Konzentrationsverlauf für den an den Quellraum grenzenden Flur ist in Abbildung 43 dargestellt.

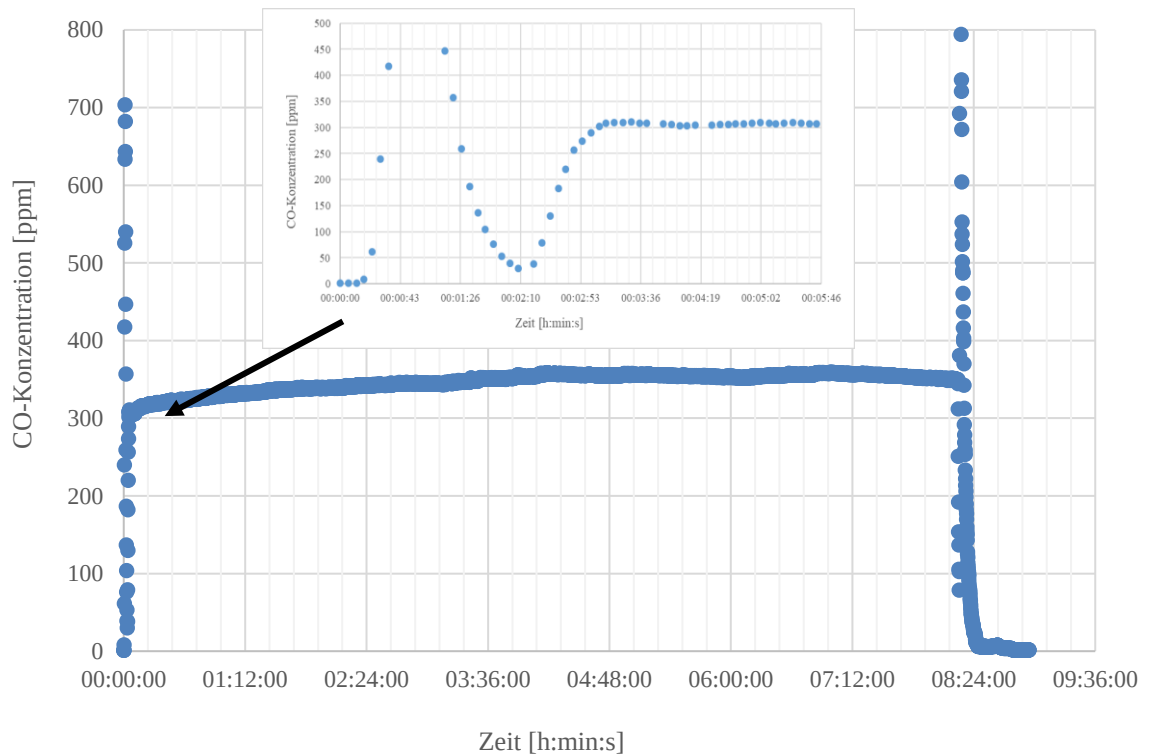


Abbildung 43: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR (Flur, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter

Die Öffnung der Druckgasbehälter im Quellraum führt im Flur schlagartig zu einem Konzentrationsanstieg auf nahezu 700 ppm. Dieser ist der Tatsache geschuldet, dass die Tür zwischen Quellraum und Flur noch nicht vollständig verschlossen bzw. abgedichtet war und dass sich die Messposition in der Nähe zum Quellraum befand. Nach Schließen der Tür sinkt die Konzentration, aufgrund der Verteilung des CO im gesamten vorhandenen Volumen des Flurs, zügig wieder auf ca. 30 ppm ab. Dies geschieht innerhalb der ersten beiden Minuten. Danach lässt sich mit einer Rate von 4,2 ppm/s ein CO-Konzentrationsanstieg auf ungefähr 300 ppm erkennen. Dieser vergleichsweise schnelle Anstieg erfolgt innerhalb der ersten drei Minuten, in dem sich die CO-Konzentration im Quellraum gerade aufbaut. Aufgrund der Öffnung der beiden Druckgasflaschen und dem Ausströmen des CO/N₂-Gemisches ist vermutlich im Quellraum ein leichter Überdruck vorhanden, der sich über den Türspalt zum Flur abbaut. Die Folge ist der schnelle Anstieg der Konzentration im Flur in den ersten Minuten der Versuchszeit. Bis zu diesem Zeitpunkt des Versuches sind die Konzentrationsverläufe nicht durch Permeationsvorgänge verursacht. Erst nach der dritten Versuchsminute scheint der Vorgang beendet zu sein und die CO-Konzentration steigt über die restliche Versuchszeit mit einer mittleren Rate von

4,3 ppm/h, was sich nun größtenteils auf Permeationsvorgänge zurückführen lässt. Um das Lüften zu Versuchsende einzuleiten, musste die Tür zum Quellraum erneut geöffnet werden, was sich anhand des plötzlichen Kurvenanstiegs zeigt. Hier wird kurzzeitig eine Konzentrationspitze von 1040 ppm CO erreicht. Der darauffolgende schnelle CO-Abfall ist das Resultat der beginnenden Lüftungsmaßnahmen.

In Abbildung 44 ist der CO-Konzentrationsverlauf für das an den Quellraum grenzende WO dargestellt. Für die Auswertung konnten Messwerte, über die Versuchszeit, von den beiden mittig an der Wand platzierten Warnmeldern (2-1 in Abbildung 36) herangezogen werden.

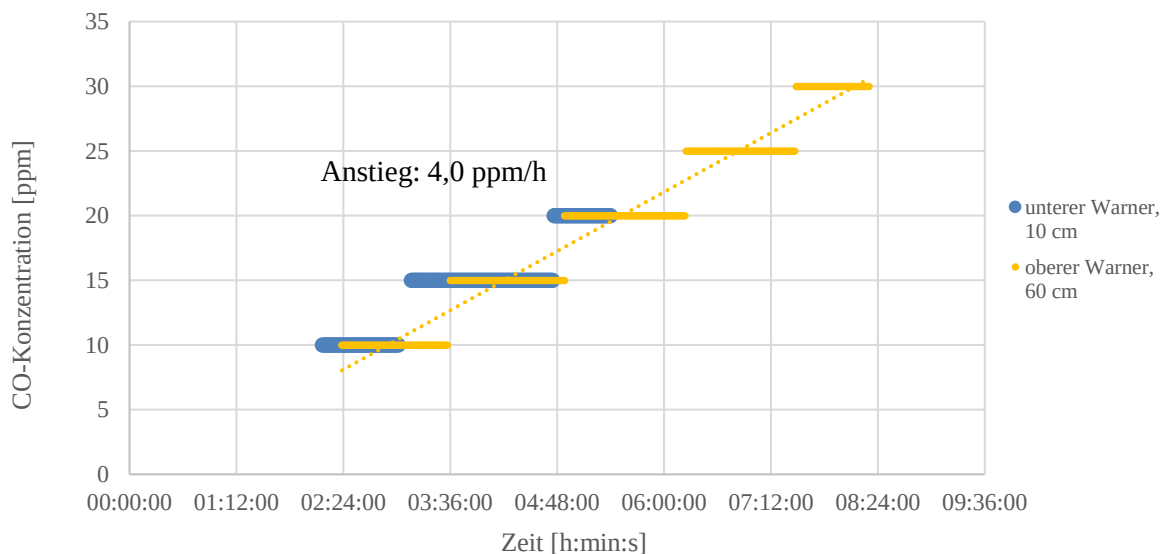


Abbildung 44: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels Hauswarnmelder (WO, 1. OG, rechts) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter; Melder 10 cm bzw. 60 cm über dem Boden, mittig

Die in Abbildung 42 erläuterten Sprünge der CO-Konzentrationswerte im Quellraum sowie im Flur, aufgrund der Öffnung der Druckgasbehälter, haben auf die in Abbildung 44 dargestellten Messwerte keinen Einfluss. Entsprechend kann mittels linearer Regression der CO-Konzentrationsanstieg für das WO mit 4,0 ppm/h bestimmt werden und ist dem Anstieg im Flur nach der dritten Versuchsminute sehr ähnlich.

Für die vier anderen Melder, im WO an der Außenwand (4-1 in Abbildung 36), stehen Werte von Beginn und Ende des Versuchs für die Auswertung zur Verfügung. Hier ist der Einfluss der Öffnung der Druckgasbehälter, zu Beginn des Versuchs im Quellraum, durch eine anfängliche Konzentration von 60 ppm CO am Warner direkt an der Wand erfassbar. Es ist nicht eindeutig geklärt, inwiefern das Gas durch die Bauteilanschlüsse oder der mit Bauschaum provisorisch verschlossenen Bohrung für das Heizungsrohr gelangt ist. Am Ende des Experiments wurden Konzentrationen von 30 ppm bzw. 35 ppm CO abgelesen.

Die maximale CO-Konzentration, die während des Versuchs im über dem Quellraum liegenden KI erfasst werden konnte, beträgt 15 ppm. Dieser Wert ist zum Ende des Versuchs von beiden Warnmeldern (10 cm bzw. 60 cm über dem Boden) angezeigt worden.

Trotz geringerer Ausgangskonzentration im Quellraum, im Vergleich zu Szenario 1, liegen die Konzentrationen in dem Kontrollzimmer (KI, 2. OG, rechts), oberhalb der Versuchswohnung, in einer ähnlichen Größenordnung. Daraus lässt sich auf einen langsamen CO-Durchtritt durch die Decke schließen.

Der Warnmelder im SZ der linken Nachbarwohnung (direkt an den Quellraum grenzend) zeigte keine Werte während des Versuchs an. Somit wird, über den kompletten Versuchszeitraum, von einer Maximalkonzentration in Höhe von 10 ppm CO ausgegangen. Die Ursache für den geringeren CO-Anstieg in diesem Raum, im Vergleich zum WO der rechten Wohnung, sind die fehlenden Störstellen, wie z.B. Bohrungen für die Heizungsleitung. Ansonsten sind die Wandaufbauten des Quellraums, hin zu den jeweiligen benachbarten Räumen, laut Abbildung 34, identisch. Auch der Ventilator im SZ der linken Wohnung, auf dem im WO der rechten Wohnung verzichtet worden ist, trägt, aufgrund der Verteilung des CO über das gesamte Raumvolumen, dazu bei, dass kleinere Konzentration erfasst werden.

Auf die Berechnung der CO-Permeation durch die Wand zum Flur wird verzichtet, da der Großteil des Gases bei der Türöffnung zu Versuchsbeginn bereits durchgetreten ist. Der aus der Berechnung hervorgehende Fehler wäre zu groß und eine Interpretation nicht aussagekräftig. Die Permeationsraten zu den angrenzenden Räumen für die Wände und Decken lassen sich, wie folgt, berechnen:

WO, 1. OG, rechts: ca. 4 -7 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$

KI 2. OG, rechts: 1 - 2 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$.

Die berechneten Permeationsraten liegen damit, wie erwartet, unterhalb derer des vorherigen Versuchs mit dem Szenario 1 - Grillabend.

Die Diffusionskoeffizienten für die an den Quellraum angrenzenden Wände und Decken sind in

Tabelle 9 aufgelistet und liegen in der gleichen Größenordnung wie im ersten Szenario (abend Tabelle 8). Auch hier ist die Hauptursache für die Abweichung zu den Laborwerten [Seliger et al., 2019] den weiteren CO-Permeationsprozessen der Permeation in den darauffolgenden Räumen oder, im Falle einer Außenwand, an die Umgebung, zu finden. Diese, ausgehend vom Quellraum, zweite Reihe von Permeationsvorgängen findet aufgrund der, im Vergleich zum

eigentlichen Quellraum, geringen Konzentrationen, nur sehr langsam statt, tragen aber dennoch zu den niedrigeren Diffusionskoeffizienten bei.

Tabelle 9: Bauteildicken, Permeationsflächen, Konzentrationsanstiege und Diffusionskoeffizienten für die Räume bzw. Wände bei Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter

Wand/Decke zwischen Quellraum und	Dicke Bauteil [cm]	Permeations- fläche [m ²]	Anstieg CO- Konzentration [ppm/h]	Diffusions- koeffizient [m ² /s]
WO 1. OG, rechts	15	13,1	4,0	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Flur 1. OG, rechts	6	6,2	-	-
KI 2. OG, rechts	14	10,3	-	$5,1 \cdot 10^{-8}$

Der Diffusionskoeffizient für die Wand zwischen Quellraum und angrenzendem WO liegt gleich auf mit dem Vergleichswert des vorangegangenen Versuchs (Szenario 1 - Grill). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen der beiden untersuchten Szenarien zeigen die Großversuche vergleichbare Ergebnisse.

4.4.5 Fazit

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Großversuche die, u.a. in den Laborversuchen des Vorgängerprojekts [Seliger et al., 2019] gewonnene Erkenntnis, dass CO durch Betonbauteile permeieren kann. Genaue Rückschlüsse über die Permeation an Bauteilanschlüssen lassen sich bei den Großversuchen nicht ableiten. Die Permeation in angrenzende Räume zeigt sich geringer als in den Laborexperimenten. Eine der Ursachen lässt sich, anhand der Tatsache der Weiterpermeation in andere Räume, bzw. im Falle einer Außenwand, an die Umgebung begründen. Dieser Effekt wurde im Labor, aus Fragen der Sicherheit, durch konstruktive Maßnahmen bewusst nicht betrachtet. Ein weiterer Grund für die reduzierte Permeation von CO in den Großversuchen ist der Zustand der Betonwandoberflächen, den es zu beachten gilt. Die Betonwände in dem Mehrfamilienhaus wurden über Jahre mit Farbe, Tapete und anderen diversen Bauprodukten, wie Grundierungen, behandelt, was auf beiden Seiten zum Verschluss der Poren im

Beton führt. Auch wenn ein Teil der Wandoberflächen durch Rückbaumaßnahmen und Vandalismus, wie in Abbildung 35 beispielhaft dargestellt, freigelegt wurde, sind größere Teile der Wandflächen noch vollständig oder teilweise in Takt. Dieser Zustand beeinflusst die Permeationsrate von CO. Die Vergleichswerte der Laborversuche im Vorgängerprojekt [Seliger et al., 2019] beziehen sich auf unbehandelte Betonproben. Unter Beachtung dieser Randbedingungen müssen somit die Messwerte in den Großversuchen geringer ausfallen.

Einen weiteren Effekt auf den Transport von CO in benachbarte Räumen haben Störungen im Wandaufbau, wie Undichtigkeiten, Risse und Bohrungen, wie sie in realen Gebäuden auftreten. Sie erleichtern die Ausbreitung von Gasen in der Wohnung. Dieser Störstelleneffekt wird in beiden Szenarien deutlich.

Aus den Großversuchen lassen sich folgende Erkenntnisse extrahieren:

- Die Großversuche bestätigen die CO-Permeation durch Betonwände bei bekannten Unfallszenarien. Auch eine Ausbreitung des Gases, bei langanhaltend hoher Konzentration an CO im Quellraum, sowie ausreichender Zeit erfolgt nicht nur in die benachbarten Räume, sondern auch darüber hinaus. Der Prozess der CO-Ausbreitung über die benachbarten Räume des Quellraumes hinaus, ist, bei geschlossenen Türen, ein sehr langsamer Vorgang. Im Falle eines Feuerwehreinsatzes muss entsprechend vom Einsatzleiter, abhängig von der vermuteten Expositionsdauer und der Konzentration des CO, entschieden werden, ob über die übliche Vorgehensweise der Erkundung, nach dem bekannten Ampelsystem, hinaus verfahren werden sollte.
- Ausgehend vom Quellraum sollte in allen angrenzenden Räumen, bei denen Störstellen in der Wand erkennbar sind, mit einer höheren CO-Konzentration gerechnet werden, als es bei angrenzenden Räumen mit einer geschlossenen Wand der Fall ist.
- Bei hohen CO-Konzentrationen kommt es umso schneller zu einer Verteilung des Gases, nachdem verschlossene Räume geöffnet werden, auf Grund des Konzentrationsunterschieds als Triebkraft.
- Der Einsatz taktischer Ventilation, mittels Lüftern, stellt eine schnelle und effektive Maßnahme zur Absenkung der CO-Konzentration in den betroffenen Räumen dar.
- Es ist zu beachten, dass, trotz Einsatz eines Hochleistungslüfters über mehrere Minuten zum Lüften der betroffenen Räume, nach Abschalten des Lüfters CO noch aus den Wänden austreten kann und somit die CO-Konzentration in den Räumen wieder ansteigt.

Entsprechend sollten nach Beendigung der Lüftungsmaßnahmen eine Überprüfung der Räume einige Zeit später erfolgen und ggf. die Lüftungsmaßnahmen wiederholt werden.

4.5 Schlussfolgerung

Das vorliegende Forschungsprojekt stellt eine Fortsetzung zu den Untersuchungen durch [Selliger et al., 2019] im IMK-Forschungsbericht Nr. 195 dar. Es untersuchte die CO-Permeation durch verschiedene Baustoffe im Labormaßstab. Entsprechend bestand der Forschungsauftrag des vorliegenden Projektes darin, die CO-Permeation durch gesamte Wandaufbauten zu analysieren. Zum Erreichen dieses Ziels wurde ein Teststand für die Untersuchung der CO-Permeation durch typische, im Bauwesen genutzte, Wandaufbauten konzipiert. Außerdem erfolgte für eine möglichst realistische Untersuchung der Ausbreitung von CO in Wohnungen die Durchführung von Großversuchen. Hierfür wurde, in zwei Szenarien, CO in einer 3-Zimmer-Wohnung eines unbewohnten Mehrfamilienhauses freigesetzt und dessen Ausbreitung messtechnisch erfasst.

Die speziell angefertigte Versuchskammer und die dafür hergestellten Wandaufbauten ermöglichen, durch Abdichtung nach außen, einheitliche Durchtrittflächen und gleiche Wandstärken, eine Reduzierung von beeinflussenden Parameter. Somit können vergleichbare Rückschlüsse auf die eigentlichen Permeationsvorgänge gezogen werden. In den Laborversuchen wurden charakteristische Kennzahlen, wie z.B. die Permeationsrate oder der Diffusionskoeffizienten, von verschiedenen Wandaufbauten und -anschlüssen bestimmt. Auch die Verwendung verschiedener Materialien zur Oberflächenbehandlung von Wandaufbauten waren Gegenstand der Untersuchungen.

Die untersuchten Gipskarton-Wandprobekörper und deren Modifizierungen mit Tapete; Wandfarbe und Fliesen zeigten, dass sich die reinen Gipskarton-Probekörper hinsichtlich der CO-Permeation kaum von den tapezierten oder mit Wandfarbe behandelten unterscheiden. Die Behandlung einer Gipswand mit Farbe und Tapete beeinflusst somit die CO-Permeation durch eine Gipskartonwand kaum. Das Anbringen von Fliesen hingegen hat durchaus einen Einfluss auf die Permeationsrate von CO. Beide betrachteten unterschiedlichen Fliesenarten tragen zu einer Verringerung der CO-Permeationsraten bei. Es zeigten sich auch deutliche Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Fliesenarten. So scheint nicht das eigentliche Material der Fliesen ausschlaggebend zu sein, sondern deren Größe. Je kleiner die Fliesen sind, desto mehr Fugenfläche ist vorhanden. Somit ist davon auszugehen, dass Letztere ausschlaggebend für den Großteil der CO-Permeation ist. Die untersuchten Wand-/Deckenanschlüsse liegen im Ranking

zwischen den gefliesten und den reinen Gipskarton-Wänden. Untereinander zeigen sich zwischen gleitendem Deckenanschluss und flächiger Anschlussdichtung kaum Unterschiede bei den Laboruntersuchungen. Einen deutlichen Einfluss, in Richtung einer geringeren CO-Permeation, lässt sich bei einer Polystyrol-Dämmung in einer Gipskartoneinfachständerwand nachweisen. Mit Abstand die geringste Permeationsrate zeigt sich bei der Holztafelwand. Hier belegen die Messdaten, dass im Grunde zwei 18 mm starke OSB-Platten die CO-Permeation, im Vergleich zu der Gipskartonwand, um das 8-fache reduzieren. Die Laboruntersuchungen bestätigen die Ergebnisse bereits vorangegangener Untersuchungen zu dieser Thematik. [Scholz, 2020] hat ebenfalls festgestellt, dass CO beispielsweise durch Gipskarton deutlich schneller permeiert als durch einen Holzaufbau.

Allgemein lassen sich bisherige Erkenntnisse, die vorgestellten Laboruntersuchungen und die Großversuche qualitativ gut in Einklang bringen. Es konnte die Permeation von CO durch Wände in andere Räume bis hin in angrenzende Etagen nachgewiesen werden.

Störstellen, wie Undichtigkeiten oder Bohrungen für z.B. Heizungsleitungen und Kabelführungen, tragen zur Beschleunigung der CO-Ausbreitung in einer Wohnung bei. Es zeigt sich ein wesentlicher Unterschied bei den Großversuchen, im Vergleich zu den Laboruntersuchungen. Die CO-Ausbreitung beschränkt sich nicht nur auf eine Barriere, sondern diffundiert, mit ansteigender Konzentration in den benachbarten Räumen, auch durch darauffolgende Wände, Decken und Böden. Diese zweite Ebene der Ausbreitung wird in den Laborversuchen konstruktiv unterbunden. Die Folge, und damit der Unterschied zwischen den Groß- und Laborversuchen, ist ein geringerer CO-Anstieg in den Räumen um den Quellraum, was zur Verringerung der berechneten charakteristischen Kenngrößen führt, wie beispielsweise die Permeationsraten für die einzelnen Durchtrittsflächen.

Neben Aussagen zur Ausbreitung von CO, unter möglichst realistischen Bedingungen, konnten auch Hinweise für den Feuerwehreinsatz in solch einer Lage bestätigt und gewonnen werden. Die wesentliche Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass die sich schnell aufbauende CO-Konzentration durch intensives, taktisches Lüften, zum Beispiel unter Einsatz von Drucklüftern, schnell und effektiv minimiert wird.

Allerdings muss beachtet werden, dass sich in den Wänden und anderen Barrieren noch CO befinden kann. Somit sollte, nach dem Beenden der Lüftungsmaßnahmen, eine Überprüfung der Räume auf einen erneuten CO-Anstieg erfolgen. Auch wenn die daraus resultierenden Konzentrationen bei den Versuchen deutlich geringer ausfielen, als es bei einem realen Ereignis der Fall sein würde, sollte beachtet werden, dass sich in den Versuchsräumlichkeiten keine anderen

Körper, wie Anbauwände, Polstermöbel etc. befanden, die ebenfalls CO aufnehmen und wieder abgeben können. Bei einem realen Einsatz sollte somit von einem höheren Wiederanstieg der CO-Konzentration nach einer Lüftungsmaßnahme ausgegangen werden. Somit sollten, direkt nach einem Vorfall, die Räumlichkeiten nicht wieder verschlossen werden, sondern gegebenenfalls die Lüftungsmaßnahmen durch die Feuerwehr wiederholt werden oder die Räume über einen längeren Zeitraum nachgelüftet werden, z.B. durch eine natürliche Belüftung mittels Öffnen von Fenstern.

5 LITERATUR

[Ansyco, 2016]

Ansyco GmbH, Gasmet DX4000N FT-IR Analysator tragbar Bedienungsanleitung Hardware, Karlsruhe, 2006

[Blondeau et al. 2003]

Blondeau, P.; Tiffonnet, A. L.; Damian, A.; Amiri, O.; Molina, J. L.: Assessment of Contaminant Diffusivities in Building Materials from Porosimetry Tests. *Indoor Air*, Volume 13, pp. 302-310, 2003

[DIN 18183-1, 2018]

DIN 18183-1: NABau, Trennwände und Vorsatzschalen aus Gipsplatten mit Metallunterkonstruktionen – DIN-Normenausschuss Bauwesen, 2018

[DIN 4102-4, 2016]

DIN 4102-4, NABau, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, 2016

[EuroBaustoffe, 2021]

Innendämmung mit Polystyrol-Verbundplatten, <https://www.eurobaustoff.de/bauen-wohnen-leben/profi-informationen/baumaterialien/daemmung/innendaemmung-mit-polystyrol-verbundplatten/>, abgerufen am 19. 01. 2021

[Frankfurter Neue Presse, 2020]

Frankfurter Neue Presse, Gas-Alarm in Shisha-Bar: 35 Menschen zeigen Vergiftungsanzeichen, 17.10.2020, online: <https://www.fnp.de/lokales/wiesbaden/wiesbaden-kohlenstoffmonoxid-shisha-bar-feuerwehr-polizei-raeumung-erbenheim-vergiftet-zr-90072573.html>, abgerufen am 12.11.2020

[Geiker et al., 1995]

Geiker, M.; Grube, H.; Luping, T.; Nilsson, L.-O.; Andrade, C.: 9 Laboratory test methods, in RILEM Report 12 Performance Criteria for Concrete Durability, Edited by Kropp, J. and Hilsdorf, H. K. 1995, ISBN 0 419 19880 6

[GESTIS, 2021]

GESTIS-Stoffdatenbank des IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung), abgerufen am 8. Januar 2021.

[Goldstein, 1998]

M. Goldstein: Carbon monoxide poisoning. *Journal of Emergency Nursing*. Band 34, Nr.6, 12/ 2008, S.538–542; Struttman, A. et al.: Unintentional carbon monoxide poisoning from an unlikely source. *The Journal of the American Board of Family Practice*. Band 11, Nr.6, 11/ 1998, S.481–484

[Gunnarsen et al. 1994]

Gunnarsen, L.; Nielsen, P.; Wolkoff, P.: Design and Characterization of the CLIMPAQ, Chamber for Laboratory Investigations of Materials, Pollution and Air Quality. *Indoor Air*, 4(1), pp. 56-62, 1994

[Hampson et al., 2013]

Hampson, N.B.; Coutney, T.G.; Holm, J.R.: Diffusion of Carbon Monoxide Through Gypsum Wallboard, *JAMA*, 2013 Vol. 310, Nr. 7, 2013

[Hesse, 2002]

Hesse, M.; Meier, H.; Zeeh, B.: *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*, Thieme Verlag Stuttgart; New York; 6. Auflage, 2002.

[Holzforschung Austria, 2021]

- Holzforschung Austria. Trennwand twrxo07a-02, <https://www.dataholz.eu/bauteile/trennwand/variante/kz/twrxo07a/nr/2.htm>, abgerufen am 21.01.2021
- [Institut für Erhaltung und Modernisierung, 1997]
- Institut für Erhaltung und Modernisierung, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Wohnungsbauserie 70, Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, 1997
- [Mann, 2014]
- Mann, B., Spezialarchiv Bauen in der DDR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Stand 2014, online: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/dokumente/3-4-17-wohnungsbauserie-wbs70.pdf>, abgerufen am 19.11.2020
- [MDR, 2019]
- MDR Thüringen, Deubachshof: 26 Personen mit Verdacht auf Kohlenmonoxid-Vergiftung im Krankenhaus, 02.12.2019, online: <https://www.mdr.de/thueringen/west-thueringen/wartburgkreis/kohlenmonoxid-vergiftung--automobilzulieferer-deubachshof-100.html>, abgerufen am 12.11.2020
- [Meininghaus et al. 2000]
- Meininghaus, R.; Gunnarsen, L.; Knudsen, H.: Diffusion and Sorption of Volatile Organic Compounds in Building Materials-Impact on Indoor Air Quality. *Environmental Science & Technology*, 34(15), 2000
- [Pyrek, 2015]
- Pyrek, R.: Kohlenstoffmonoxid (CO) – die unsichtbare Gefahr, Brandschutzforum Austria, Aprilsymposium, 2015, www.co-vergiftung.at, erhalten am 27.02.2018
- [RAE Systems, 2020]
- RAE Systems, Toxi RAE 3 Data Sheet, San Jose, 2020
- [Scholz, 2020]
- Scholz, Diffusionsverhalten von Kohlenstoffmonoxid, *BrandSchutz*, 2/20, S. 100-102, 2020
- [Seliger et al., 2009]
- U. Seliger, K. Keutel, M. Koch, Entwicklung eines toxischen Gasgemisches in Räumen durch Restglut im Holzkohlegrill, Institut für Brand- und Katastrophenschutz, 2009
- [Seliger et al., 2019]
- U. Seliger, S. Wegner, J. Voigt-Jungton; Untersuchung der Diffusion von Kohlenstoffmonoxid durch Baustoffe; *IMK-Forschungsbericht Nr. 195*, Mai 2019
- [Singer et al. 2004]
- Singer, B. C.; Revzan, K. L.; Hotchi, T.; Hodgson, A. T.; Brown, N. J.: Sorption of Organic Gases in a Furnished Room, *Atmospheric Environment*, Volume 38, pp. 2483-2494, 2004
- [Süddeutsche, 2014]
- Süddeutsche, Giftige Gase aus Holzpellets, 20.07.2014, online: <https://www.sueddeutsche.de/gesundheit/todesfaelle-wegen-kohlenmonoxid-gefaehrliche-gase-aus-holzpellets-1.2054102>, abgerufen am 13.11.2020
- [Sudhoff, 2020]
- Interview mit Sudhoff, P. (17. 12. 2020). Bester Aufbau einer Holztafelwand für die Untersuchung von CO-Permeation.
- [TGA-Fachplaner, Holzpellets emittieren Kohlenstoffmonoxid, 2013, online: <https://www.tga-fachplaner.de/heizungstechnik/eine-vermeidbare-gefahr-holzpellets-emittieren-kohlenstoffmonoxid>, abgerufen am 13.11.2020]
- [Thilenius et al., 1925]
- Thilenius, R.; Pohl, T.: Über die Diffusion von Gasgemischen durch Baumaterial, 1925; erschienen in *Angewandte Chemie* Vol. 38, 2006
- [Westfalen-Blatt, 2020]

Westfalen-Blatt, Elf Verletzte nach Silvestergrillen, 01.01.2020, online: <https://www.westfalen-blatt.de/OWL/Kreis-Guetersloh/Guetersloh/4082411-Verdacht-auf-CO-Vergiftung-in-Guetersloh-Spexard-zwei-Personen-in-Duesseldorfer-Spezialklinik-mit-Video-Elf-Verletzte-nach-Silvestergrillen>, abgerufen am 12.11.2020)

[Wiegler 2016]

Wiegler, G.: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2016

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Gaslaufschema, links: Aufbau unter einem Laborabzug, rechts: schematische Darstellung mit Gasströmen	8
Abbildung 2: Versuchskammer mit einem Wandaufbauprobekörper; fahrbar auf einem Wagen gelagert, links: Permeatkammer, mittig: Probekörper, rechts: CO-Kammer	9
Abbildung 3: Abdichtung der Messkammer entlang des Kammerkragens	9
Abbildung 4: Technische Zeichnung der Gipskartoneinfachständerwand, zweilagig beplankt [DIN 18183-1, 2018]	11
Abbildung 5: Gipskarton-Probekörper links: unbeplankt; rechts: beplankt	12
Abbildung 6: links: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit Polystyrolämmung, einseitig noch unbeplankt; mittig: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit einseitiger Fliesenoberfläche (klein), rechts: Probekörper Gipskartoneinfachständerwand mit einseitiger Fliesenoberfläche (groß).....	13
Abbildung 7: links: Holztafelbauprobekörper von hinterer Seite beplankt, Hohlräume mit Mineralwolle verfüllt; rechts: verspachtelter Stoß der Gipskartonschicht an der Holztafelwand	14
Abbildung 8: links: Probekörper aus gemauerten Kalksandsteinen; Mitte: mit stabilisierendem Stahlrahmen; rechts: mit Isolierung.....	15
Abbildung 9: Technische Zeichnung Abdichtung mit flächiger Anschlussdichtung (durchgehendes Dichtungsband) [DIN 18183-1, 2018]	16
Abbildung 10: Probekörper mit flächiger Anschlussdichtung, noch ohne Isolierband.....	16
Abbildung 11: Technischer Aufbau gleitender Deckenanschluss [DIN 4102-4, 2016].....	17
Abbildung 12: Fertigung gleitender Deckenanschluss: unten Betonkörper, darüber Verbindungsschichten, oben: Gipskartonwand einseitig beplankt	17
Abbildung 13: links: schwarzes, beidseitig klebendes Butylkautschukband auf den Seitenflächen des Probekörpers; rechts: Abklebung mit rotem, gasdichtem Klebeband (final isolierter Wandprobekörper).....	18
Abbildung 14: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf in beiden Kammern bei der Permeation an einer Gipskartoneinfachständerwand, unbehandelt (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO).....	20
Abbildung 15: Mittelwerte der zeitlich abhängigen CO-Konzentration in den Kammern für unbehandelte Gipskartoneinfachständerwände GK1 und GK2 (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO)	21

Abbildung 16: gemittelte Permeationsrate für unbehandelte Gipskartoneinfachständerwände GK 1 und GK2 (Beaufschlagung mit 8.200 ppm CO)	22
Abbildung 17: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Wandfarbe modifizierten Gipskartoneinfachständerwände W1 und W2	23
Abbildung 18: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Wandfarbe modifizierten Gipskartoneinfachständerwände W1 und W2	24
Abbildung 19: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände FL1 und FL2	25
Abbildung 20: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände mit großem Fugenanteil FL1.....	26
Abbildung 21: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Fliesen modifizierten Gipskartoneinfachständerwände mit geringem Fugenanteil FL2.....	26
Abbildung 22: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Tapete modifizierten Gipskartoneinfachständerwände T1 und T2	27
Abbildung 23: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Tapete modifizierten Gipskartoneinfachständerwände T1 und T2	28
Abbildung 24: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der mit Polystyrol als Dämmmaterial modifizierten Gipskartoneinfachständerwände PS1 und PS2	29
Abbildung 25: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der mit Polystyrol als Dämmmaterial modifizierten Gipskartoneinfachständerwände PS1 und PS2 ..	30
Abbildung 26: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Holztafelwände-Wandprobekörper H1 und H2	31
Abbildung 27: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Holztafelwände H1 und H2	32
Abbildung 28: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Wandprobekörper mit flächiger Anschlussdichtung X1 und X2	33
Abbildung 29: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Wandprobekörper mit flächiger Anschlussdichtung X1 und X2	34
Abbildung 30: zeitliche CO-Konzentrationsverläufe der Wandprobekörper mit gleitendem Deckenanschluss Y1 und Y2	35
Abbildung 31: gemittelte CO-Konzentrationen sowie gemittelte Permeationsraten der Wandprobekörper mit gleitender Anschlussdichtung Y1 und Y2.....	36

Abbildung 32: Gegenüberstellung aller mittleren CO-Konzentrationsverläufe der untersuchten Wandaufbauprobekörper	38
Abbildung 33: Gegenüberstellung aller mittleren Permeationsraten der untersuchten Wandaufbauprobekörper	38
Abbildung 34: Etagengrundriss mit links: Zweiraumwohnung und rechts: Dreiraumwohnung im für den Großversuch genutzten Mehrfamilienhaus	41
Abbildung 35: baulicher Zustand der Testwohnung, demontierte Rohre und Armaturen, Füllung von Löchern in Wänden mit Montageschaum, abgeklebte Fenster.....	42
Abbildung 36: Grundriss der kontaminierten Versuchswohnung im 1. OG sowie der Nachbarwohnung mit gekennzeichneten Messstellen, Ventilatoren und Beleuchtung.....	44
Abbildung 37: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR im Quellraum (KI, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 1 - Grillabend.....	49
Abbildung 38: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR (Flur, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 1 - Grillabend.....	50
Abbildung 39: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels Hauswarnmelder (WO, 1. OG, rechts) beim Szenario 1 – Grillabend; Melder 10 cm über dem Boden, direkt an der Wand	51
Abbildung 40: CO-Konzentrationsverlauf im Zimmer oberhalb des Quellraums (KI, 2.OG, rechts) bei Szenario 1 - Grillabend	52
Abbildung 41: CO-Permeationsraten durch verschiedene Wände im Szenario 1 –Grillabend	53
Abbildung 42: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR im Quellraum (KI, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter	55
Abbildung 43: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels FTIR (Flur, 1. OG, rechte Wohnung) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter.....	56
Abbildung 44: CO-Konzentrationsverlauf erfasst mittels Hauswarnmelder (WO, 1. OG, rechts) beim Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter; Melder 10 cm bzw. 60 cm über dem Boden, mittig.....	57

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Akute CO-Vergiftungssymptome in Abhängigkeit der aufgetretenen CO-Konzentration [Goldstein, 1998]	3
Tabelle 2: Art und Maße der untersuchten Wandprobekörper	11
Tabelle 3: Schichten im Holztafelwandaufbau [Sudhoff, 2020]	14
Tabelle 4: Zusammenfassung der aus den Messungen ermittelten Parameter (Durchbruchzeit t_d , Zeit zum Erreichen der Konzentrationen von 500 ppm t_{500} und 1.000 ppm t_{1000} sowie Diffusionskoeffizienten D , mittlerer CO-Anstieg und Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression)	37
Tabelle 5: Raumlängenmaße und –volumina der versuchsrelevanten Räume, Raumhöhe: 2,80 m	41
Tabelle 6: Zeitlicher Verlauf Szenario 1 - Grillabend	47
Tabelle 7: Zeitlicher Verlauf der Messung zu Szenario 2 – Suizid/Druckgasbehälter.....	48
Tabelle 8: Bauteildicken, Permeationsflächen, Konzentrationsanstiege und Diffusionskoeffizienten für die Räume bzw. Wände bei Szenario 1 - Grillabend	53
Tabelle 9: Bauteildicken, Permeationsflächen, Konzentrationsanstiege und Diffusionskoeffizienten für die Räume bzw. Wände bei Szenario 2 – Suizid mit Druckgasbehälter	59