# BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG

# DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



# Untersuchung der Diffusion von Kohlenstoffmonoxid durch Baustoffe

195

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. 195

# Untersuchung der Diffusion von Kohlenstoffmonoxid durch Baustoffe

von

Dipl.-Chem. Ursula Seliger Dr. rer. nat. Sandra Wegner Dr. rer. nat. Jan Voigt-Jungton

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

> Heyrothsberge Mai 2019

FA-Nr.: 94 (2/2017) IdF

ISSN 170-0060

# **BERICHTS-KENNBLATT**

BERICHTSNUMMER:	TITEL DES BERICHTES:		ISSN:	
195	Untersuchung der Diffusion von		0170-0060	
	Kohlenstof	monoxid durch Baustoffe	9	
AUTOREN:		DURCHFÜHRENDE INSTITUTION:		
DiplChem. Ursula Seliger		Institut für Brand- und Katastrophenschutz		
Dr. rer. nat. Sandra Wegner		Heyrothsberge		
Dr. rer. nat. Jan Voigt-Jungton		Biederitzer Straße 5		
		D-39175 Biederitz, OT Heyrothsberge		
		Direktor: Ltd. BrD Frank Mehr		
NUMMER DES AUFTRAGES:		AUFTRAG GEBENDE INSTITUTION:		
94 (2/2017) IdF		Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder. Arbeitskreis V -		
DATUM DES BERICHTES:		Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,		
Mai 2019		Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
SEITENZAHL: 69	BILDER: 74	TABELLEN: 17	LITERATURVERWEISE: 79	

KURZFASSUNG:

In einer klein skalierten Versuchsapparatur wurde die Permeation von Kohlenstoffmonoxid (CO) durch verschiedene Baustoffe untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass das toxische Gas CO in der Lage ist, durch alle untersuchten Baustoffe zu permeieren. Bei Anliegen einer über die Versuchszeit konstanten CO-Ausgangskonzentration wurde kontinuierlich die sich ausbildende Konzentration des CO-Permeates in der unteren Versuchskammer über die gesamte Versuchszeit mittels FTIR-Spektroskopie gemessen. Die erhaltenen Messwerte wurden grafisch über die Versuchszeit aufgetragen. Aus dem auf die Initialphase folgenden Bereich des stationären Anstiegs der Masse-Grafen, wenn der CO-Konzentrationsgradient noch groß war, erfolgte die Berechnung der Diffusionskoeffizienten. Als Randbedingung wurde somit eine eindimensionale stationäre Diffusion angenommen. Aus den CO-Konzentrationswerten erfolgte jeweils die Berechnung einer Massenstromdichte, die hier als CO-Permeationsrate definiert wurde. Deren Werte wurden grafisch über die Versuchszeit dargestellt. Es zeigten sich klare Abhängigkeiten des Permeationsprozesses vom Material, dessen Dicke sowie dem anliegenden CO-Konzentrationsgradienten. Insgesamt kann die CO-Permeation bei den vorliegenden Baustoffproben als relativ schnell erfolgend bewertet werden und zwar in Mengen und Zeiten, die toxisch relevant sind. Es wurde ein Ranking der untersuchten Baustoffproben bezüglich der gemittelten Durchbruchzeiten sowie der Zeiten bis zum Erreichen einer CO-Permeatkonzentration in der unteren Versuchskammer von 10 % der oberhalb der Proben anliegenden CO-Belastungskonzentration erstellt.

SCHLAGWÖRTER: Permeation, Diffusion, Baustoff, Beton, Gips, Ziegel, Holz, Kohlenstoffmonoxid, FTIR-Spektroskopie

# **INHALTSVERZEICHNIS**

1 AU	UFGABENSTELLUNG	1
1.1	Forschungsauftrag	1
1.2	Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens	1
2 M	ETHODIK DER INFORMATIONSGEWINNUNG	3
3 AU	USGANGSLAGE UND RAHMENBEDINGUNGEN	3
3.1	CO-Quellen und Todesfallstatistik	3
3.2	Permeation	5
3.2.1	Bestimmung des Diffusionskoeffizienten	
3.2.2	Bestimmung der Durchbruchzeit und Permeationsrate	
3.3	Datenlage aus Publikationen	14
4 EX	XPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	
<i>A</i> 1	Untersuchte Baustoffe	16
<b>4</b> 11	Reton	10
4.1.2	Selbstverdichtender Beton	
4.1.3	Porenbeton	
4.1.4	Zementgebundene Platten	
4.1.5	Ziegel	
4.1.6	Gips-Bauplatten	
4.1.7	Holz	
4.2	Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung	
4.3	Auswertung und Verarbeitung der Messwerte	
4.4	Diskussion der Ergebnisse	
4.4.1	CO-Permeation an Proben aus Normalbeton	
4.4.2	CO-Permeation an Proben aus selbstverdichtendem Beton	
4.4.3	CO-Permeation an Proben aus Porenbeton	
4.4.4	CO-Permeation an Proben aus zementgebundenen Platten	50
4.4.5	CO-Permeation an Ziegelproben	
4.4.6	CO-Permeation an Proben aus Gipsplatten	57
4.4.7	CO-Permeation an Holzproben	
5 ZU	USAMMENFASSUNG	
6 LI	TERATUR	



# **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 2017 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. 94 (IdF – 2/17) "Untersuchung der Diffusion von Kohlenstoffmonoxid durch Baustoffe".

#### **1.2** Notwendigkeit und Ziel des Forschungsvorhabens

In den letzten Jahren war ein deutlicher Anstieg der Vergiftungsfälle durch Inhalation von Kohlenstoffmonoxid (CO) zum Teil durch Unfall (z. B. CO-Freisetzung aus defekten Heizungsanlagen, durch unsachgemäßen Umgang mit Zier- und Heizkaminen, durch schlecht gelüftete Shisha-Bars) oder in suizidaler Absicht (z. B. durch Abbrennen von Holzkohle in geschlossenen Räumen) zu verzeichnen. Es gibt zahlreiche Fälle, in denen sich das freiwerdende CO in den Gebäuden ausbreitete und zur Intoxikation von Personen führte, die sich bezüglich der CO-Quelle in weiter entfernten Räumen befanden.

Im Zuge der Diskussion um die Ausrüstung von Rettungsdienstpersonal mit CO-Warngeräten kam immer wieder auch die Diskussion um das Diffusionsvermögen des CO durch Baustoffe auf, um die Ausbreitung von CO in einer Gebäudegeometrie neben Ursachen wie offene Türen, Kabel- und Rohrleitungskanäle u. Ä. erklären zu können.

Eine mögliche Diffusion des CO durch das Material der Baustoffe wurde lediglich im Analogschluss aus publizierten Untersuchungsergebnissen über die Diffusionsfähigkeit einer kleinen Anzahl anderer gasförmiger Stoffe durch Baustoffe abgeleitet, wobei wenig oder nichts über die Randbedingungen dieser Untersuchungen bekanntgegeben wurde. Bisher konnten keine gesicherten Untersuchungsergebnisse, welche die Diffusion von CO durch Baustoffe belegen, recherchiert werden. Belastbares Datenmaterial bezüglich der Baustoffe gibt es lediglich für Gipskarton (siehe Kapitel 3.4). Das angestrebte Forschungsprojekt soll diesbezüglich gesicherte Daten erbringen.

So bestand die Aufgabe, mittels experimenteller Untersuchungen gesicherte Erkenntnisse für die Diffusionsfähigkeit des CO durch das Material verschiedener Baustoffe zu erlangen.

Hierbei sollte eine Kooperation mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz an der Technischen Universität Braunschweig angestrebt werden, die aber nicht zustande kam, da dort in den letzten Jahren an keiner vergleichbaren Problematik gearbeitet worden war.

Für die experimentellen Arbeiten war eine Versuchsapparatur zu konzipieren und aufzubauen. Diese Apparatur muss zwei hintereinander liegende Räume aufweisen, deren Trennwand der jeweils zu untersuchende Baustoff darstellt. Die Schwierigkeit bestand hier in der vollständigen Baustoffes Abdichtung des einzusetzenden gegenüber der Versuchsapparatur. In dem einen Raum war über die Versuchszeit eine konstant anliegende CO-Konzentration zu erzeugen, so dass der Parameter CO-Partialdruck als Triebkraft für die Diffusion durch den Baustoff über die Versuchszeit konstant gehalten werden konnte. Der Raum, in welches das diffundierte Gas gelangt, war mit entsprechender Gasanalytik auszurüsten, um die CO-Konzentration über die Versuchszeit kontinuierlich erfassen zu können. Es sollte die Diffusion des CO an einer Auswahl verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit von der anliegenden CO-Konzentration, der Einwirkzeit des CO und der Dicke des Baustoffes untersucht werden. Somit waren die Parameter CO-Konzentration, Einwirkzeit und Dicke des Baustoffes zu variieren. Es konnte eine bereits bestehende Versuchsapparatur, die allen genannten Kriterien entsprach, genutzt werden.

Die Temperaturabhängigkeit des Prozesses wurde nicht untersucht, da nach [Ollivier et al. 1995] der Einfluss der Temperatur auf die Gaspermeabilität von Beton im Bereich von 0 °C bis 50 °C gering ist, weil sich die Viskosität der Gase hier nicht deutlich ändert. Ebenso waren Diffusions- und Ausbreitungsprozesse des CO durch baulich bedingte Öffnungen nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes und blieben daher unberücksichtigt.

Durch das Forschungsvorhaben wird Daten- und Informationsmaterial bereitgestellt, das als Grundlage für ein Umdenken in vielfältiger Hinsicht dienen kann. Daraus können sich Empfehlungen für die Überprüfung sowohl der Ausrüstung von Einsatzkräften mit persönlicher Schutzausrüstung sowie Messtechnik als auch der entsprechenden Richt- und Grenzwerte und der taktischen Vorgehensweise bei entsprechenden Einsätzen ableiten. Möglicherweise muss daraus resultierend auch über eine Pflicht zur Installation von CO-Warnmeldern in Haushalten und öffentlichen Einrichtungen nachgedacht werden.

# 2 METHODIK DER INFORMATIONSGEWINNUNG

Zur Bearbeitung des Forschungsauftrages gemäß Aufgabenstellung wurde eine umfassende Recherche nach themenrelevanten Publikationen sowie Inhalten und Ergebnissen von Tagungen durchgeführt und ausgewertet, die auch während der Bearbeitung spezieller Themenbereiche kontinuierlich vervollständigt und aktualisiert wurde. Die Recherche beinhaltete ebenfalls die Suche nach entsprechenden Ereignissen der letzten Jahre sowie deren Auswertung.

Teilweise ergaben die Recherchen Anhaltspunkte für ein tieferes Vordringen in die Materie, so dass zu bestimmten Fragestellungen eine persönliche Kontaktaufnahme zu Verfassern von Publikationen erfolgte und Expertenmeinungen eingeholt wurden.

Es wurden Gesprächsrunden und Symposien des "Runder Tisch CO", der von der Feuerwehr Hamburg ins Leben gerufen wurde, für die Information und den fachlichen Austausch genutzt. Hier trafen Wissenschaftler, Rechtsmediziner, Mediziner, Einsatzkräfte der Gefahrenabwehr (Polizei und Feuerwehr), Fachleute aus der Industrie und entsprechenden staatlichen Institutionen aus dem In- und Ausland aufeinander. In Auswertung der ersten Zusammenkunft wurde am IBK Heyrothsberge die Notwendigkeit für dieses Forschungsprojekt abgeleitet.

# **3** AUSGANGSLAGE UND RAHMENBEDINGUNGEN

#### 3.1 CO-Quellen und Todesfallstatistik

In den Medien haben Berichte über Vergiftungsfälle durch Kohlenmonoxid eine gewisse Präsenz und, wie bereits angemerkt, mit steigender Tendenz. "Die meisten Menschen wissen nicht, wie gefährlich Kohlenmonoxid ist. Aktuelle Statistiken belegen: Kohlenmonoxid-Vergiftungen sind die häufigsten tödlich verlaufenden Vergiftungen in den Industrieländern. Allein in Deutschland rechnen Experten jährlich mit bis zu 1.000 Todesfällen durch das gefährliche Gas. Die Dunkelziffer ist hoch, weil nicht jede Kohlenmonoxid-Vergiftung erkannt wird. Hinzu kommen mehrere tausend Verletzte. Häufige Auslöser sind defekte Feuerstätten oder der unsachgemäße Gebrauch von offenen Flammen in geschlossenen Räumen. Mit CO-Warnmeldern könnte das Risiko minimiert werden und Betroffene frühzeitig gewarnt werden. So lautet das Ergebnis des FeuerTRUTZ-Symposiums "Gefahren durch Kohlenmonoxid im häuslichen Umfeld", das Ende November [2017 - Anm. d. Verf.] bei der Frankfurter Feuerwehr stattfand. Zu der Veranstaltung trafen sich Experten aus den Bereichen Rechtsmedizin, Risikoforschung, Feuerwehr und aus dem Schornsteinfegerhandwerk." Das meldet der auf dem Symposium gebildete Arbeitskreis Kohlenmonoxid [AK CO 2017], dessen Ziel es ist, das Wissen über Kohlenmonoxid-Gefahren im häuslichen Umfeld zu fördern, die Öffentlichkeit zu sensibilisieren und damit die Zahl der Kohlenmonoxid-Opfer zu verringern. Quellen für eine Freisetzung von Kohlenmonoxid kann es im häuslichen Umfeld mehrere geben. Abbildung 1 zeigt einige Beispiele, weitere sind Heizkamine, das Betreiben von Arbeitsgeräten mit Verbrennungsmotoren in Innenräumen, das Indoor-Grillen mit Holzkohlegrills oder gezieltes Erzeugen von CO in suizidaler Absicht. Was häufig auch unterschätzt wird oder als Information gänzlich fehlt: Beim gleichzeitigen Betreiben von raumluftabhängigen Feuerstätten und Abluft-Wäschetrocknern oder Dunstabzugshauben muss für ausreichende Frischluftzufuhr gesorgt werden, ansonsten erzeugen diese Geräte einen Unterdruck im Haus, der den Strom der Verbrennungsgase im Schornstein umkehren kann. In der Folge gelangt CO ins Haus oder die Wohnung!



Abb. 1: Kohlenmonoxid: Tödliche Gefahr in den eigenen vier Wänden [AK CO 2017]

Die vom Statistischen Bundesamt erfassten Daten belegen, dass jedes Jahr deutlich mehr Menschen an Kohlenmonoxid-Vergiftung sterben als es Brandtote<sup>1</sup> gibt. Im Jahr 2015 waren es 648 Todesfälle, so viele wie seit 1998 nicht mehr. Auffällig ist der hohe Anteil von Männern, der 78 % im Jahr 2015 betrug (Abbildung 2). Axel Hahn, Toxikologe am Bundesinstitut für Risikobewertung, vermutet eine hohe Dunkelziffer bei den CO-Vergiftungen, da es in Deutschland kein Vergiftungsregister gibt und der Meldepflicht für

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sterbefälle durch Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen

Vergiftungen nur unzureichend nachgekommen wird. Geschätzt vergiften sich jährlich mehr als 3000 Menschen in Deutschland, von denen etwa 1000 versterben [Witte 2015].



Abb. 2: Sterbefälle in Deutschland durch Kohlenmonoxid-Vergiftung nach [FeuerTrutz 2017] und [Destatis 2018]

Da der Austritt von Kohlenmonoxid ein schleichender Prozess ist, den auch wache Menschen nicht von sich aus feststellen können, wird nicht nur vom Arbeitskreis CO der Einsatz von CO-Warnmeldern im häuslichen Umfeld empfohlen [AK CO 2018], auch der Deutsche Feuerwehrverband gibt diesbezügliche eine Empfehlung [DFV 2017]. Eine Pflicht zur Installation von CO-Warnmeldern besteht in Deutschland derzeit nicht, in anderen Ländern ist die Legislative da schon ein Stück weiter. Wie vom [AK CO 2018] zu erfahren ist, wird beispielsweise in Kalifornien seit Januar 2011 verlangt, dass in Einfamilienhäusern mit Gas- oder Ölheizung mindestens ein CO-Warnmelder installiert werden muss. Mit Stand vom Jahresanfang 2018 sind in 32 US-Staaten ähnliche Regelungen in Kraft, weitere sollen nachziehen. Auch in Kanada und Großbritannien ist diese lebensrettende Technik Pflicht. Seit 2015 muss in England in jedem Wohnraum eines Mietobjektes, der eine Wärmequelle auf Verbrennungsbasis enthält, ein Warnmelder eingebaut sein.

#### 3.2 Permeation

Permeation bezeichnet den Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper auf molekularer Ebene durchdringt (siehe z. B. [Wiegleb 2016]). Die Triebkraft für diesen Prozess ist ein Gradient des chemischen Potentials des Permeats und wird in vereinfachten Modellen durch messbare Konzentrations- oder Druckgradienten ersetzt. Ohne äußere Einflüsse bewegt sich das Permeat immer in die Richtung der geringeren Konzentration bzw.

des niedrigeren Partialdrucks. Gasförmige Stoffe sind wegen ihrer oft kleinen Moleküle besonders zur Permeation befähigt. Die Gasmoleküle werden bei diesem Prozess zunächst an der Oberfläche des Festkörpers adsorbiert, danach dringt das Gas in das Material ein (Absorption). Es beginnt die Diffusion, die Durchdringung des Materials auf molekularer Ebene. Der Stoff durchdringt den Festkörper durch Poren bzw. molekulare Zwischenräume. Auf der anderen Seite des Festkörpers treten die Gasmoleküle wieder heraus und lösen sich von dessen Oberfläche (Desorption), um in den davor liegenden Gasraum zu gelangen. In Abbildung 3 sind die vier Schritte der Permeation schematisch dargestellt.



Abb. 3: Teilschritte der Permeation (nach [Wiegleb 2016])

Obwohl sich der Titel des Forschungsprojektes nur auf die Diffusion bezieht, ist der Vorgang, welchen es zu untersuchen galt, die Permeation des Kohlenstoffmonoxids durch ausgewählte Baustoffe, bei dem, wie zuvor erläutert, die Diffusion einen Teilschritt ausmacht.

Trotzdem werden Bewegungsvorgänge, bei denen Moleküle aufgrund von Konzentrationsunterschieden (exakter aufgrund des chemischen Potenzials) in einem System wandern, unter dem Begriff der Diffusion zusammengefasst, die durch die Fick'schen Gesetze charakterisiert werden kann. Als Voraussetzungen nennt [Weh 2002] einen Nichtvorhandensein Konzentrationsunterschied als treibende Kraft, das eines Temperaturgradienten sowie die Homogenität des Diffusionsmediums.

Nach dem 1 Fick'schen Gesetz (Gleichung 1) ist die Teilchenstromdichte (Fluss) J proportional zum Konzentrationsgradienten  $\partial c / \partial x$  entgegen der Diffusionsrichtung. Die Proportionalitätskonstante ist der Diffusionskoeffizient D. Für eine gerichtete Diffusion im stationären Zustand gilt:

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

Im Gegensatz zum 1. Fick'schen Gesetz, das einen zeitlich konstanten Diffusionsfluss beschreibt, stellt das 2. Fick sche Gesetz (Gleichung 2) eine Beziehung zwischen zeitlichen und örtlichen Konzentrationsunterschieden dar und eignet sich somit zur Darstellung instationärer Diffusion. Es existieren für diese Differentialgleichung zahlreiche analytische und numerische Lösungsansätze, die jedoch stark von den Anfangs- und Randbedingungen abhängen.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2}$$

Nach [LFZG 2018] beschreibt die Permeabilität eines Gesteins, wie durchlässig es für Flüssigkeiten oder Gase (Fluide) ist. Je besser die Poren in einem Gestein miteinander verbunden sind (Interkonnektivität), umso durchlässiger, also permeabler, ist es. Die physikalische Einheit der Permeabilität entspricht einer Fläche und wird in verschiedenen Einheiten angegeben. Gebräuchlich für die Permeation von Festkörpern sind Darcy (Einheitenzeichen D<sup>2</sup>) und Perm (Einheitenzeichen perm oder Pm). Hierbei gelten:

1 D = 
$$9,869 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$$
 [Chemie 2018]  
1 (metrisches) Pm =  $10^{-4} \text{ m}^2$  [Physik 2018]

Für [Jacobs et al, 1994] hängt die Durchlässigkeit von Gestein für Fluide vor allem von seiner Porosität, der Porengröße und -verteilung sowie der Klüftigkeit<sup>3</sup> ab. Je poröser ein Gestein und je größer seine Körnung ist, umso permeabler ist es. Mit wachsender Dichte oder Zementation (Verkittung) der Gesteinsbestandteile hingegen nimmt die Durchlässigkeit ab. Gemäß den Autoren gibt es Ausnahmen, da manche Gesteine zwar hoch porös, trotzdem aber nicht sehr durchlässig sind, weil ihre Poren kaum miteinander verbunden sind. Dagegen können Gesteine mit geringem Porenraum sehr durchlässig sein, wenn sie von Klüften durchzogen sind. Wobei der Begriff Klüfte<sup>4</sup> bei Gestein angebracht ist, für hergestellte Baustoffe zeigt [Thienel 2011], dass nicht nur der summarische Porenanteil (Porengehalt)

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> nicht zu verwechseln mit dem Diffusionskoeffizienten D
 <sup>3</sup> Aussage über den Grad der Zerklüftung eines Gesteinskörpers [Spektrum 2018]

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Feine Trennflächen im Gestein

von Bedeutung ist, sondern auch die Art, Form, Größe und Verteilung der Poren, sowie ob diese offen oder geschlossen sind (Abbildung 4). [Meyer 2007] beschreibt für Beton das System der Kontaktzonen (Bereiche des Aufeinandertreffens von Gesteinskörnern und Zementstein) als durchgehende poröse Struktur im Beton.





Abb. 4: Geschlossene Poren (links) und offene Pore (rechts) mit A Sackpore, B Flaschenhalspore und C durchgehende Pore [Thienel 2011]

[Jacobs et al. 1994] nahmen Untersuchungen an zementgebundenen Werkstoffen zur Gasund Wasserpermeabilität u. a. in Abhängigkeiten vom Alter, der Lagerung und der Temperatur vor. Das Gas war Wasserstoff. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass bei zementgebundenen Werkstoffen mit dem Alter und dem Feuchtigkeitsgehalt die Gaspermeabilität abnimmt. Mit zunehmendem w/z-Wert<sup>5</sup> steigt die Permeabilität. [Tauscher 2004] diskutiert die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Parameter wie w/z-Wert und Hydratationsgrad und deren Auswirkung auf Porengrößenverteilung und Porenvernetzung, von denen letztlich die Permeabilität des Zementsteins abhängt.

[Beese et al. 2014], die sich mit der Entwicklung von Permeationsmesstechnik befassten, bezeichnen diesen Vorgang als Gasdurchlässigkeit. Aus ihrer Sicht werden deren Mechanismen häufig mit den Begriffen Permeation und Leck zusammengefasst, wobei die Abgrenzung der Begriffe nicht ganz eindeutig ist. Gemäß ihren Ausführungen wird mit Permeation in der Regel ein Stofftransport aufgrund von Diffusion, oft sogar nur der Stofftransportmechanismus der Lösungsdiffusion bezeichnet, während als Leck dagegen sowohl der Stofftransport aufgrund von turbulenter und laminarer Strömung, als auch der diffusive Transport durch Poren und sogar das Ausgasen von Flüssigkeiten (sogenannte "virtuelle Lecks") beschrieben wird. Als relevante Transportmechanismen für die Durchdringung von Gasen durch Festkörper werden von ihnen die in Abbildung 5 gezeigten verschiedenen Mechanismen der Konvektion und Diffusion aufgeführt, die bis auf die Lösungsdiffusion alle Kanäle in Form von durchgehenden Poren, Kapillaren oder Fehlstellen im Festkörper benötigen. Die Prozesse b) bis g) beruhen alle auf Diffusion.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Wasserzementwert, gibt Verhältnis von Wasser zu Zement an, siehe 4.1.1



Abb. 5: Stofftransportmechanismen durch Festkörper nach [Beese et al. 2014]
a) laminarer Fluss, b) molekulare Diffusion, c) Knudsendiffusion,
d) Oberflächendiffusion, e) Stofftransport durch Kapillarkondensation,
f) figurelle Diffusion, g) Lösungsdiffusion

Grundlegende Voraussetzung für die Permeation von Gasen durch Festkörper ist, dass deren Molekülgröße kleiner als die Größe der Poren und molekularen Zwischenräume ist, die in den Festkörpern auftreten. Ein wichtiger Parameter, der diesen Prozess beeinflusst, ist der kinetische Durchmesser der Moleküle. Er ist vereinfacht ausgedrückt der kleinste Durchmesser, mit dem sich ein Molekül in einer Dimension präsentieren kann. Die ermittelten Werte für den kinetischen Durchmesser schwanken je nach Bestimmungsmethode, so dass in der Literatur stark voneinander abweichende Angaben zu finden sind [Arnold 2009]. Geht man von einem idealisierten Molekülmodell mit starren Kugeln aus, gibt es mehrere Wege, den Moleküldurchmesser d von Gasen experimentell zu bestimmen. [Moore 1990] diskutiert als Methoden die Berechnung aus der Gasviskosität und die Berechnung aus der van-der-Waals-Konstanten b. Tabelle 1 enthält Berechnungsergebnisse für einige Gase.

Molekül	d aus der Gasviskosität	d aus der van-der-Waals-Konstanten b
Ar	286	286
CO	380	318
CO <sub>2</sub>	460	324
Cl <sub>2</sub>	370	330
He	200	246
H <sub>2</sub>	218	275
Hg	360	238
Ne	234	264
N <sub>2</sub>	316	314
O <sub>2</sub>	296	290
H <sub>2</sub> O	272	287

 Tabelle 1:
 Moleküldurchmesser d in Pikometer<sup>6</sup> [Moore 1990]

Der Prozess des diffusiven Stofftransports in porösen Systemen setzt sich in vielen Fällen, aus mehreren Mechanismen zusammen. Wie groß der jeweilige Anteil eines Teilprozesses am Gesamtstofftransport ist, hängt unter anderem von der Triebkraft (Druck- oder Konzentrationsgradient), der Temperatur und der Porentextur des Feststoffes ab. Der Diffusionsmechanismus wird durch die Natur der diffundierenden Teilchen sowie, wie aus Abbildung 5 unschwer erkennbar ist, deren Wechselwirkungen untereinander und mit dem Feststoff bestimmt [Reimann 2001]. Bei molekularer Diffusion bewegen sich die Moleküle aufgrund von Konzentrationsunterschieden oder externen Kräften gegeneinander. Es dominieren die Molekül-Molekül-Stöße gegenüber den Molekül-Wand-Stößen. Die mittlere freie Weglänge der Moleküle ist kleiner als der Porendurchmesser. Knudsen-Diffusion tritt auf, wenn die mittlere freie Weglänge größer als der Porendurchmesser ist. Es treten überwiegend Molekül-Wand-Stöße auf, während Molekül-Molekül-Stöße vernachlässigbar sind. Bei der Oberflächendiffusion bewegen sich die adsorbierten Moleküle entlang der Porenoberfläche [Keil 1999]. Der Stofftransport durch Kapillarkondensation stellt auch eine Kategorie der Adsorption dar. Hierbei nimmt ab einem gewissen Partialdruck die Gleigewichtsbeladung deutlich stärker zu, als bei reiner physisorptiven Adsorption zu erwarten wäre. Zur Beschreibung des Verhaltens kann die Veränderung des Dampfdruckes einer Flüssigkeit an gekrümmten Oberflächen herangezogen werden [Ortmann 2016]. Figurelle Diffusion liegt vor, wenn die Molekülgröße im Bereich des Porendurchmessers liegt [Emig, Klemm 2017].

Den verschiedenen Diffusionsmechanismen liegen zur Interpretation der experimentell ermittelten Diffusionskoeffizienten entsprechende Stofftransportmodelle zugrunde, die u. a. vom Verhältnis der mittleren freien Weglänge der diffundierenden Teilchen zum Porendurchmesser abhängen können, aber auch von weiteren unterschiedlichen Faktoren bestimmt werden. Das hat zur Folge, dass die Diffusionskoeffizienten der jeweiligen Mechanismen von unterschiedlichen Abhängigkeiten geprägt sind (vergl. z. B. [Reimann 2001], [Ortmann 2016]). Hinzu kommt, dass für die Berechnung von Diffusionskoeffizienten eine genaue Beschreibung der Porenstruktur des Festkörpers erforderlich ist, die Porenstrukturmodelle aber der tatsächlichen Struktur meistens nicht gerecht werden [Reimann 2001]. Oft treten in porösen Festkörpern Poren mit sehr unterschiedlichen Größen und Geometrien auf, wie die Beispiele des Materials Beton zeigen (siehe Kapitel 4.1.1).

Somit wird deutlich, dass für die Durchdringung poröser Materialien nicht die gesamte Materialoberfläche A zur Verfügung steht, sondern nur die Summe aller Porenquerschnittsflächen A<sub>P</sub>. Da die Massen- und Molenstromdichten definitionsgemäß aber genau auf die gesamte Materialoberfläche bezogen werden, ist das Verhältnis beider Flächen A<sub>P</sub>/A zu bilden, wodurch die Porosität  $\Phi$  beschrieben wird. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Poren unregelmäßig geformt und labyrintartig miteinander verknüpft sind. Damit wird die tatsächlich zurückzulegende Diffusionsstrecke L<sub>P</sub> größer als die äußerlich sichtbare Körperlänge L. Dieser Umstand findet im so genannten Tortuositätsfaktor  $\tau$  Berücksichtigung, der das Verhälnis der beiden Strecken L<sub>P</sub>/L darstellt. Wegen der komplexen Struktur des Porensystems sind der Tortuositätsfaktor wie auch der mittlere Porendurchmesser nur schwer theoretisch zu bestimmen, weshalb die Diffusionskoeffizienten experimentell ermittelt werden müssen. Zuverlässige Berechnungsmethoden für Diffusionskoeffizienten sind bisher noch nicht bekannt [Specht 2014].

Die Bestimmung eines Permeationskoeffizienten ist nach [Beese et al. 2014] nur für isotrope Proben, deren Durchlässigkeit ausschließlich auf dem Mechanismus der Lösungsdiffusion beruht, zulässig.

#### 3.2.1 Bestimmung des Diffusionskoeffizienten

Der Diffusionskoeffizient ist entsprechend Gleichung (1) mit der Teilchenstromdichte verknüpft. Die Teilchenstromdichte J ist experimentell bestimmbar. Somit kann der Diffusionskoeffizient D bei Annahme einer eindimensionalen stationären Diffusion durch eine Platte (vergleiche [Barrer 1941]) und bekannten Randbedingungen bestimmt werden (Gleichung 3).

$$D = J \cdot \frac{l}{\Delta c} \tag{3}$$

In Gleichung (3) stehen / für die Prüfkörperdicke in m und  $\Delta c$  für den Konzentrationsgradienten in g/m<sup>3</sup> bzw. mol/m<sup>3</sup> und repräsentieren die Eintritts- und Austrittskoordinaten auf dem Diffusionsweg bzw. die Eingangs- und Ausgangskonzentrationen des diffundierenden Mediums. Daraus resultiert als Dimension m<sup>2</sup>/s für den Diffusionskoeffizienten.

Nach ähnlichem Ansatz erfolgte die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten aus den hier auszuwertenden experimentell ermittelten Daten der Untersuchungen zur CO-Diffusion nach der von [Geiker et al. 1995] angewandten Methode. Bei Einsetzen eines Diffusions-vorgangs erzeugen die diffundierenden Moleküle innerhalb der Probe zeitlich abhängig unterschiedliche Konzentrationsprofile, bis sie schließlich auf der anderen Seite aus der Probe austreten. Die Diffusion wechselt dabei vom Initialzustand (Ungleichgewicht) in den Gleichgewichtszustand (Abbildung 6a). Wird die diffundierenden Masse über die Zeit aufgetragen, ergibt sich der in Abbildung 6b gezeigte Kurvenverlauf, der ab einem bestimmten Zeitpunkt einer konstanten Massenänderung entspricht.



Abb. 6: a) Konzentrationsprofile bei der Diffusion im Initial- und Gleichgewichtszustand [Gleiker et al. 1995]



> t3

 $\Delta m = const.$ 

t.

Der konstante Anstieg der Masse ist ein Maß für den Diffusionskoeffizienten, der aus den Versuchsdaten gemäß [Geiker et al. 1995] nach Gleichung 4 berechnet wurde. Das auszuwertende Intervall erstreckte sich über den CO-Konzentrationsbereich von 500 ppm bis 1000 ppm bei 10.000 ppm CO-Ausgangskonzentration bzw. 50 ppm bis 100 ppm bei 1.000 ppm CO-Ausgangskonzentration. In diesem Bereich war die Masseänderung über die Versuchszeit konstant.

$$D = \frac{V \cdot \Delta Q}{A \cdot \Delta t} \cdot \frac{L}{(c_1 - c_2)} \tag{4}$$

Hierbei sind:

- V Volumen der Permeat-Zelle (Zelle, die den diffundierenden Stoff aufnimmt) (m<sup>3</sup>)
- ΔQ Anstieg der CO-Konzentration in Permeat-Zelle (kg/m<sup>3</sup>)

Δt Zeitintervall (s)

- A mit CO beaufschlagte Probenfläche (m<sup>2</sup>)
- L Dicke der Probe (m)
- c<sub>1</sub> CO-Ausgangskonzentration (kg/m<sup>3</sup>)
- c<sub>2</sub> Mittelwert der CO-Konzentration in der Permeat-Zelle im Zeitintervall (kg/m<sup>3</sup>)

Es muss dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die erhaltenen an Diffusionskoeffizienten von den experimentellen Randbedingungen abhängen. Auch wird bei den zugrundegelegten Modellen für die Ableitung der Berechnungsmethoden davon ausgegangen, dass die Diffusionskoefizienten konzentrationsunabhängig sind. Tatsächlich trifft das aber auf die meisten nicht zu, wie beispielsweise [Mersmann 1986] ausführt. Außerem ist zu berücksichtigen, dass der Diffusionskoeffizient, der die Diffusion durch den Porenraum poröser Körper beschreibt, ein so genannter effektiver Diffusionskoeffizient ist.

Da nicht einzelne Poren, sondern der gesamte Porenraum zu betrachten ist, stellt er eine makroskopische Größe gemäß Gleichung (5) dar (z. B. [Mersmann 1986]).

$$D_e = \frac{\varepsilon_t}{\tau} D \tag{5}$$

In Gleichung (5) bedeuten (siehe auch 3.2):

- $\varepsilon_t$  Porosität, die für den Transport eines diffundierenden Gases zur Verfügung steht, sie entspricht der Gesamtporosität abzüglich der Poren, die aufgrund ihrer Größe für die diffundierenden Teilchen nicht zugänglich sind, und abzüglich Sackgassen- und blinder Poren (Poren ohne Verbindung zum restlichen Porensystem)
- *τ* Tortuosität (Gewundenheit des Porensystems)

Wie aus den vorangestellten Erläuterungen hervorgeht, sind die genannten Parameter des Porensystems nur schwer bestimmbar und auch nicht Ziel dieses Forschungsprojektes, weshalb die aus den experimentellen Untersuchungen hervorgehenden Diffusionskoeffizienten nur die effektiven sein können. Für einige der in diesem Projekt untersuchten Baustoffe sind bei [Specht 2014] Werte für Porosität und Tortuosität zu finden (Tabelle 2).

Stoff	Dichte kg/m³	Porosität	Tortuositätsfaktor
Ziegel	1360	0,49	6,7 – 6,9
Klinker	2050	0,19	380,0 - 470,0
Beton	840	0,62	7,0 – 9,0
Ytong	540	0,79	6,0 - 9,0

Tabelle 2: Daten zu Porosität und Tortusität ausgewählter Baustoffe [Specht 2014]

#### 3.2.2 Bestimmung der Durchbruchzeit und Permeationsrate

Untersuchungen zur Permeation finden sehr viel an Verpackungsmaterialien und Materialien für Arbeitsschutzbekleidung statt. Daraus resultiert auch, dass ein wesentliches Merkmal die Durchbruchzeit ist. Allgemein wird die Durchbruchszeit als die Zeitspanne zwischen dem ersten Kontakt einer Chemikalie mit der Außenseite des zu durchdringenden Festkörpers und ihrem Nachweis auf dessen anderer Seite bei niedrigster nachweisbarer Permeationsrate bezeichnet. Wie [Oppl 1999] aufzeigt, wird die Durchbruchzeit unterschiedlich definiert und wird auch auf unterschiedliche Weise ermittelt. Das hat zur Folge, dass Ergebnisse von Untersuchungen stark voneinander abweichen können. Laut [Oppl 1999] können diese bis zu 50 % betragen. Für die Prüfung von Chemikalienschutzhandschuhen nach DIN 374-3 und EN 369 ist die Durchbruchzeit als die Zeitspanne von dem Beginn der Belastung bis zu dem Zeitpunkt, zu dem eine Stoffmenge von mindestens 1µg/(cm<sup>2</sup>·min) durch den Prüfling hindurchgetreten ist, im Entwurf der DIN EN

ISO 6529 als normalisierte Durchbruchzeit bezeichnet. Ähnlich erfolgt die Angabe gemäß ASTM F-739. Hier ist die Angabe der Durchbruchzeit auf eine Permeationsrate von 0,1 µg/(cm<sup>2</sup>·min) bezogen. Nach ASTM 739-96 wird die Durchbruchzeit nach dem Time-lag-Verfahren bestimmt. Die Methoden sind überdies stark vom Nachweisverfahren abhängig. Für die Auswertung der in diesem Projekt ermittelten experimentellen Daten ist die Durchbruchzeit als die Zeitspanne definiert vom Beginn der Belastung der Proben bis zum ersten Nachweis des Durchtritts (Nachweisgrenzen FTIR-Gerät im sub-ppm-Bereich).

Bei den Untersuchungen an Verpackungsmaterialien und Materialien für Arbeitsschutzbekleidung gilt die Permeationsrate als Maß dafür, welche Menge eines Stoffes (Permeat) einen Festkörper in einer bestimmten Zeit durchdringen kann. Die Rate bezeichnet die Stoffmenge pro Flächen- und Zeiteinheit, abhängig von Festkörperdicke, Druck und Temperatur. In diesem Projekt wird die Permeationsrate als Maß verstanden für die Stoffmenge an CO in Mikrogramm, die in einer Sekunde eine Fläche von einem Quadratmeter durchdringt. Sie wird deshalb in der Dimension µg/m<sup>2</sup>s angegeben.

#### 3.3 Datenlage aus Publikationen

[Hampson et al., 2013] konnten zeigen, dass CO sehr gut durch Gipskartonwände treten kann. In einem System bestehend aus zwei Kammern, die durch eine Gipskartonwand getrennt sind, wurde in die eine Kammer CO eingeleitet und in der anderen Kammer die CO-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit mittels eines CO-Warners gemessen. Als trennende Wand wurden Gipskartonplatten, doppellagige Platten und gestrichene doppellagige Platten verwendet. Die Abdichtung zur Verhinderung der Diffusion von CO durch Fugen an den Übergängen Baustoff-Kammer wird nicht erwähnt. Die Anfangskonzentration wurde hier einmalig eingeleitet. Im Laufe eines Versuchs fällt sie auf Grund der Permeation des Gases in die andere Kammer ab. Ein Fünftel der Ausgangskonzentration von ca. 500 ppm wird je nach Versuch nach 17 bis 96 Minuten erreicht. Inwiefern daraus Rückschlüsse auf andere Baustoffe möglich sind, ist unbekannt.

Des Weiteren wurde die Diffusionsfähigkeit von CO durch für die Nutzung in Feuchträumen imprägnierten Gipskartonlatten von [Pyrek, 2015] untersucht. Auch hier wurde mit einem System aus zwei Kammern, die durch die Baustoffplatte getrennt sind, gearbeitet, wobei in der Publikation ebenfalls nicht näher auf die Abdichtung eingegangen wurde. In beiden Räumen wurden CO-Warner installiert. Die Ausgangskonzentration von 50 ppm wurde permanent während des Versuchs gehalten. Nach 16 Minuten war in der zweiten, anfangs CO-freien Kammer, der Konzentrationsausgleich mit Erreichen eines CO-Messwertes von 50 ppm gegeben. Ein schneller CO-Durchtritt wurde also auch hier aufgezeigt.

Es wird auf einen Review-Artikel der Fire Protection Research Foundation [Vermesi et al. 2015] verwiesen, in dem die bislang erzielten Ergebnisse zur CO-Diffusion zusammengetragen werden. Zum Beispiel wurde die Verteilung von CO in einem Haus gemessen, in dem eine CO-Freisetzung im Bad stattfand [Chang et al, 1992]. Hierbei wurden nicht nur die Baustoffe betrachtet, sondern auch Ausbreitungen durch Öffnungen und Lüftungsanlagen.

Aus der Permeation von VOCs (volatile organic compounds) durch Wände wird rückgeschlossen [Blondeau et al. 2003], [Gunnarsen et al. 1994], [Meininghaus et al. 2000], [Singer et al. 2004], dass auch der Durchtritt von CO zu erwarten wäre, da CO-Moleküle kleiner sind als die untersuchten VOCs.

In einer Publikation von [Thilenius et al., 1925] wird die Diffusion von Blausäure und einem Reizstoff durch stark und gering poröse Baumaterialien, wie Bimbsbeton, Gipsplatten und Ziegelmauerwerk behandelt. Der Versuchsaufbau besteht aus gasdicht verschlossenen Räumen. In einem Gasraum wird die Anfangskonzentration des Gases durch Einspritzen und Verdunsten lassen hergestellt und konstant gehalten. Im anderen Gasraum, der durch den Baustoff vom ersten getrennt ist, wird die Menge des durchgetretenen Gasgemischs bestimmt. Durch Gummidichtungen und einen den Baustoff gasdicht umschließenden Rahmen werden der Baustoff und die Gasräume gegen die Umgebung abgedichtet. Für die porösen Materialien der Dicke 5 cm, Bimbsbeton-, Rabitz- und Gipsplatten, wird nach sechs Stunden eindeutig Permeation festgestellt. Durch zusätzliches Zwischenlegen von Tapete wird der Blausäuredurchtritt verringert, wohingegen der Reizstoffdurchtritt unverändert bleibt. Das Anbringen von Tapete mit Kleister am Baustoff wirkte sich verringernd auf die Porengröße der Baustoffe aus, so dass der Blausäuredurchtritt stark vermindert wurde und auch der Reizstoffdurchtritt abnahm. Durch das Ziegelmauerwerk konnte nur eine sehr geringe Menge Blausäure permeieren. Der Reizstoff wurde nicht auf der anderen Seite gemessen. Noch vorhandene Feuchtigkeit im Baumaterial verringerte den Durchtritt der Gase bei allen Baustoffen. Insgesamt kann auf Grund des kleineren Moleküldurchmessers von CO geschlussfolgert werden, dass dessen Permeation durch Baustoffe stattfindet.

Es gibt darüber hinaus, außer einigen Indizien bei konkreten Einsatzsituationen, wie z.B. [Keshishian et al. 2012], [Zeit 2014], keine weiteren belastbaren Daten zu dem hier zu untersuchenden Sachverhalt.

# **4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN**

#### 4.1 Untersuchte Baustoffe

Die im Bauwesen zur Anwendung kommenden Baustoffe sind sehr unterschiedlich. Betrachtet man den Schichtaufbau einer fertigen Wand eines Bauwerkes, so ist die Vielfalt noch um einiges größer. Da treten neben dem eigentlichen Baustoff (Beton, Porenbeton, Ziegel, Trockenbauplatte, Holz etc.) Bindemittel zur Fugenverfüllung, verschiedene Putze, Anstrichstoffe, Tapeten und andere Wandverkleidungen auf. Alle diese Materialien haben einen Einfluss auf die Permeabilität von Wänden und Decken. Um erst einmal einen Eindruck über die Größenordnung des Durchdringungsvermögens von CO zu bekommen, wurden ausgewählte Baustoffe einzeln untersucht. Auch ließ die Größe der Versuchsapparatur die Untersuchung von kompletten Wandstrukturen nicht zu.

Folgende Auswahl an Baustoffen wurde getroffen:

- Normalbeton
- Beton, selbstverdichtend
- Porenbeton
- zementgebundene Leichtbetonplatten
- Ziegel
- Gipsplatten
- Holz

Holz wurde in die Untersuchungen mit einbezogen, da im Bauwesen große Mengen davon eingesetzt werden, insbesondere bei Massivbauweisen Massivholzplatten, mit Brettsperrholz, Elementen mit Brettstapelbauweise und Brettschichtholz. Gerade im innerstädtischen, mehrgeschossigen Wohnungsbau hat der Holzbau derzeit stark an Volumen gewonnen [Niemz, Sonderegger 2017]. Als Beispiel diente den Autoren die Schweiz, wo zur Zeit ihrer Recherchen ca. 6 % aller Mehrfamilienhäuser und 15 -18 % aller Einfamilienhäuser in Holz gebaut wurden, wobei das Länderdreieck Schweiz, Österreich und Süddeutschland von [FVA 2009] als die Kernländer des Holzbaus bezeichnet werden. Für Deutschland war in den letzten Jahren ein steigender Trend des Wohngebäudebaus aus Holz zu verzeichnen (siehe Abbildung 7). Der prozentuale Anteil der Holzhäuser an der Gesamtzahl beantragter Wohngebäude lag 2017 bei 17,7 %. Schwerpunkt des Holzhausbaus liegt im Bundesland Baden-Württemberg [Holzbau Deutschland 2018].





Die untersuchten Proben der ausgewählten Baustoffe stehen auch nur stellvertretend für die jeweilige Kategorie, weil es in diesen nochmals eine Vielzahl an unterschiedlichen Qualitäten gibt. Grundlegende Eigenschaften werden im Folgenden vorgestellt.

#### 4.1.1 Beton

"Das Grundrezept für Beton ist einfach und was man für ihn braucht, das liefert die Natur: Zement aus Kalkstein und Ton und als so genannte Gesteinskörnung Sand, Kies und schließlich Wasser. Der Zement spielt dabei die entscheidende Rolle, denn er bildet zusammen mit dem Wasser den Zementleim, der die Gesteinskörnung verbindet und dadurch erst ein hartes Gestein entstehen lässt. Beton ist aber nicht gleich Beton. Auf die Mischung kommt es an. Denn durch die Vielfalt der Mischungen lassen sich die Eigenschaften des Betons den jeweiligen Anforderungen anpassen. Unterschiedliche Betonzusammensetzungen ergeben verschiedene Betonarten. Wie schwer oder leicht, druckfest oder wärmedämmend Beton jeweils sein muss, hängt davon ab, welche Eigenschaften gefordert sind: Tragfähigkeit oder Sicherheit, Wärmeschutz, Feuchteschutz, Brand- oder Schallschutz." [Beton.org 2018]

So hat dieser Baustoff zahlreiche betontechnologische Innovationen erfahren. Während der einfache Beton noch ein einfaches 3-Stoff-Gemisch aus Zement, Wasser und Zuschlag war, ist High-Tech-Beton ein 6-Stoff-System aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzmittel, Zusatzstoffen und Luft [Baunetz 2018]. Laut [Bosold, Grünewald 2016] ist Beton der weltweit am häufigsten genutzte Baustoff, da seine Einsatzmöglichkeiten sehr vielfältig sind. Durch Variation der Rezepturbestandteile lässt sich ein maßgeschneiderter Baustoff herstellen. Die Vielfalt führt zu einer Reihe von Einteilungskriterien für Beton. Eine Zusammenfassung aus [Geisenhanslüke 2015], [Bosold, Grünewald 2016] und [Thienel 2018/1;3-5] ergibt folgende Kriterien:

17

Trockenrohdichte

- Leichtbeton 0,8 2,0 t/m<sup>3</sup>
   Anwendung für wärmedämmende Bauteile im Wohnungsbau sowie dort, wo für Transport, Montage oder Gebrauch ein leichter Beton benötigt wird,
- Normalbeton > 2,0 2,6 t/m<sup>3</sup>
   in der Regel unter Verwendung von in der Natur vorkommenden Gesteinskörnungen hergestellt (Abbildung 8a), universell im Wasser-, Verkehrs-, Brücken-, Wohnungs- sowie Industrie- und

Gewerbebau einsetzbar

• Schwerbeton

Hauptanwendungen als Strahlenschutzbeton zur Abschirmung von z. B.

Röntgenstrahlen in medizinischen Bereichen sowie als Ballast- oder Kontergewichte in Schiffen bzw. Kränen und Brückenwiderlagern

### <u>Gefüge</u>

• gefügedicht

Beton ist so zusammengesetzt, dass die zwischen der abgestuften Gesteinskörnung verbleibenden Hohlräume minimiert werden, z. B konstruktiver Leichtbeton (Abbildung 8b)

• haufwerksporig

im haufwerksporigem Leichtbeton (Anwendung für unbewehrte Wände, Mauersteine und Platten) sind die Gesteinskörner vom Zementmörtel umhüllt und berühren sich in dichtester Lage nur punktförmig (Abbildung 8c)

# Erhärtungszustand

• Frischbeton

fertig gemischter Beton, der sich noch in verarbeitbarem Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet wird,

• Grüner Beton

Beton unmittelbar nach dem Verdichten und noch vor dem Erstarren

Junger Beton

Beton nach dem Erstarren, der nicht mehr verarbeitbar ist

• Festbeton

Beton, der sich in festem Zustand befindet und eine gewisse Festigkeit entwickelt hat

# Ort der Herstellung

- Baustellenbeton wird am Ort der Verwendung hergestellt
- Transportbeton

in einem Transportbetonwerk gemischt und zu seinem Einsatzort geliefert

Ortbeton

auf der Baustelle in seiner endgültigen Geometrie und Lage im Bauwerk eingebaut

• Fertigteilbeton

Elemente werden in einem Fertigteilwerk hergestellt, im erhärteten Zustand auf die Baustelle transportiert und dort montiert

### Festigkeit

• Festigkeitsklassen

Einteilung aller Betone in Festigkeitsklassen, gruppiert in drei Überwachungsklassen

# Art des Einbringens

- Schüttbeton
- Pumpbeton
- Spritzbeton

# Art der Verdichtung

- Stampfbeton
- Rüttelbeton
- Schleuderbeton
- Walzbeton
- Vakuumbeton
- Selbstverdichtender Beton (SVB)

# Art der Oberflächenbeschaffenheit des Festbetons

- Sichtbeton
- Waschbeton
- Beton mit bearbeiteter Oberfläche

# Einwirkung der Umgebung

- Beton für Unterwasserschüttung
- Beton für hohe Gebrauchstemperaturen
- Beton für Strahlenschutz
- Beton für Tresore
- Flüssigkeitsdichter (FD) Beton

# Art der Bewehrung

- Stahlbeton
   mit schlaffer Bewehrung
- Spannbeton
   zusätzlich mit vorgespannten Spannstählen
- Faserbeton
   Bewehrung und Fasern aus unterschiedlichem Material



a c Abb. 8: Schnitt durch Normalbeton (a), Leichtbeton (b) und haufwerksporigem Leichtbeton (c) [Bosold, Grünewald 2016]

In die Kategorie Faserbeton fallen gemäß [Beton.org 2018] Betone, denen Fasern aus Stahl, Glas, Kunststoff oder Kohlenstoff beigemischt sind, um bestimmte mechanische Eigenschaften des Betons zu verbessern. Ein Beispiel zeigt Abbildung 9.



Abb. 9: Beispiel eines Faserbetons (Foto Bekaert in [Beton.org 2018])

Zement als hydraulisch erhärtender Baustoff spielt für die Betonherstellung eine wesentliche Rolle, denn das ist der Kleber, der im festen Zustand das ganze Gemisch mit Sand, gröberer Gesteinskörnung und Zusätzen zusammenhält [VDZ 2002]. Seine Porenstruktur (Art und Größe der Poren) bestimmen maßgeblich die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit von Festbeton [Beton.Wiki 2018]. Laut [Beton.Wiki 2018] werden folgende Poren unterschieden:

- Kornporen
- Gelporen
- Haufwerksporen
- Kapillarporen
- Luftporen
- Verdichtungsporen

Einen Überblick über die Größen vermittelt Abbildung 10.



Abb. 10: Porenarten und -größen des Zementsteins [VDZ 2002]

Haufwerksporen bei Korngemischen



a) Hohlraum bei einem Einkorngemisch



b) Verminderung des Hohlraums durch kleinere Körner

Abb. 11: Haufwerksporen bei Korngemischen [Weber 2014]

Als Kornporen werden die in den einzelnen Gesteinskörnungen enthaltenen Poren bezeichnet. Haufwerksporen ist die Bezeichnung für die Hohlräume zwischen den Körnern der Gesteinskörnung (siehe Abbildung 11), die im Normalbeton vom Zementstein ausgefüllt werden müssen, im haufwerksporigen Leichtbeton aber angestrebt werden. Im Normalbeton ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ein möglichst geringer Gehalt an Haufwerksporen erwünscht, was u. a. durch eine günstige Kornzusammensetzung erreicht wird [Beton.Wiki 2018].

Gelporen bilden sich bei der Hydratation des Zementes mit Wasser. Die Größe der dabei entstehenden Zwischenräume zwischen den Hydratationsprodukten am Zementgel<sup>7</sup>, die etwa 25 % bis 30 % des Gelvolumens einnehmen, beträgt weniger als 50 nm. Damit entsprechen sie der Größe nach etwa der Größe der Gelpartikel. In den Gelporen wird Wasser adsorptiv an den Oberflächen der Hydratationsprodukte gebunden. Dieses Gelwasser ist bei starkem Trocknen (über 105 °C) verdampfbar [Beton.Wiki 2018].

Bei der Hydratation kann Zement etwa 40 % seiner Masse an Wasser zu binden, was einem Wasserzementwert<sup>8</sup> von 0,40 entspricht. Weist der Zementleim einen höheren Wasserzementwert auf, so wird das Wasser, das vom Zement nicht gebunden werden kann, als Überschusswasser bezeichnet und benötigt Raum. Dieser Raum, den es im Zementstein einnimmt, stellt ein System feiner, oft zusammenhängender Poren dar, die man als Kapillarporen (> 100 nm) bezeichnet. Gemäß [Beton.Wiki 2018] nimmt mit steigendem Kapillarporenraum die Qualität des Zementsteins bzw. des Betons ab. Die Kapillarporen

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Bezeichnung für die Hydratationsprodukte

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Verhältnis von zugegebener Wassermenge zur Zementmenge

können mit Kapillarwasser gefüllt sein. Von [Betonkonkret 2018] ist zu erfahren, dass dieses Wasser austrocknen kann. Auch werden in dieser Quelle Schrumpfporen als weitere Porenart aufgeführt. Sie haben die gleiche Größe wie Kapillarporen und bilden sich durch Schrumpfvorgänge, da die Reaktionsprodukte der Hydratation ein kleineres Volumen als die Ausgangsstoffe haben.

Durch den Mischvorgang gelangt Luft in das Zementgel [Betonkonkret 2018], die auch bei sorgfältigem Verdichten zu einem gewissen Anteil im Beton verbleibt, verteilt auf sogenannte Luftporen. Bei einem Beton mit 32 mm Größtkorn kann dies 1 Vol.-% bis 2 Vol.-% ausmachen. Ein zu hoher Luftgehalt reduziert die Festigkeit des Betons [Beton.Wiki 2018]. Wie bei [VDZ 2002] zu erfahren war, benötigt Beton aber auch Luftporen. "Künstlich eingeführte Luftporen dienen als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden hydraulischen Drucks. Sie können im Beton nur dann ausreichend wirksam werden, wenn sie in der gesamten Matrix fein verteilt sind, die Kapillarporen entsprechend häufig unterbrechen und nicht mit Porenflüssigkeit gefüllt sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich kleine Poren mit einem Durchmesser < 300 µm besonders günstig auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auswirken. Um diese kleinen Poren zu erzeugen, werden dem Beton, der einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen soll, Luftporenbildner zugegeben." [VDZ 2002]

Ein Porenleichtbeton (Schaumbeton) mit gleichmäßig verteilten Luftporen kann durch die Zugabe von Schaumbildner in den Frischbeton hergestellt werden [Beton.Wiki 2018].

Verdichtungsporen treten auch in einem praktisch vollständig verdichteten Frischbeton ohne luftporenbildende Zusatzmittel auf. Diese enthalten in der Regel noch 1 Vol.-% bis 2 Vol.-% Luft. Durch ungeeignete Betonzusammensetzung, unsaubere Gesteinskörnung, schlechtes Mischen, Verdichten und unzureichende Nachbehandlung kann diese Maß überschritten werden, was Dichtigkeit, Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigt [Beton.Wiki 2018]. Die Größe der Verdichtungsporen wird bei [Betonkonkret 2018] mit >1 mm angegeben.

Auch beim Zement gibt es eine Vielfalt an Qualitäten mit normalen oder besonderen Eigenschaften, die Gemische aus verschiedenen mineralischen Stoffen sind [VDZ 2002]. Die Hydratation, das ist die Reaktion zwischen Zement und Anmachwasser, führt zu wasserhaltigen Verbindungen, den so genannten Hydratphasen. Diese bewirken das Erstarren und Erhärten des Zementleims (Mischung aus Zement und Anmachwasser) zum Zementstein. Die wesentlichen wasserhaltigen Verbindungen, die bei der Hydratation fast

aller Zemente entstehen deren Festigkeitsbildung bedingen, die und sind Calciumsilicathydrate, zusammengefasst als CSH-Phase bezeichnet. Sie entstehen aus den silicatischen Klinkerphasen Tricalciumsilicat und Dicalciumsilicat und können in ihrer Zusammensetzung in verhältnismäßig weiten Grenzen variieren [VDZ 2002]. Das Verhältnis von zugegebener Wassermenge zur Zementmenge wird Wasserzementwert (w/z-Wert) genannt und ist für die Zusammensetzung der sich ausbildenden Hydrate von entscheidender Bedeutung. Üblicherweise liegt dieser bei der Betonherstellung zwischen 0,40 und 0,70 [VDZ 2002]. Bei der Hydratation bildet sich ein Kristallgefüge aus, auf dessen Struktur aber auch die anderen Inhaltsstoffe Einfluss haben. Das Zementsteingefüge besteht neben Calciumsilicathydraten aus Aluminathydraten, Aluminatsulfathydraten und Calciumhydroxid. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen beispielhaft ESEM<sup>9</sup>-Aufnahmen von Zementsteinstrukturen nach unterschiedlicher Hydratationszeit. Die Beispiele sind repräsentativ für Zemente mit optimal angepasstem Sulfatträger [VDZ 2002].



Abb. 12: ESEM-Aufnahme von Zementstein nach drei Stunden Hydratation, erste nadelige CSH-Primärkristallite und kurzstengelige prismatische Ettringitkristalle<sup>10</sup> sind sichtbar [VDZ 2002]



Abb. 13: ESEM-Aufnahme von Zementstein nach 28 Tagen Hydratation, dichtes CSH-Gefüge und bankige Calciumhydroxidkristalle sind sichtbar [VDZ 2002]

Diese Aufnahmen machen deutlich, dass allein schon aus der Zementsteinstruktur, die auf Grund des Aufbaus der Hydratationsprodukte kein absolut dichtes Gefüge ermöglicht, eine Porosität des Betons gegeben ist.

Wie in [VDZ 2002] erläutert wird, können in diesem Porensystem des Zementsteins in Abhängigkeit von der Porengröße und dem Feuchtegehalt in den Poren (luft- oder wassergefüllt) Transportvorgänge durch Diffusion, kapillares Saugen oder laminare Strömung bzw. durch Kombination dieser Mechanismen ablaufen. Wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt ist, sind Diffusionsvorgänge von Atomen, Molekülen oder in Wasser

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Environmental Scanning Electron Microscope

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> prismatisch nadelförmiges Trisulfat 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3 CaSO<sub>4</sub> · 32 H<sub>2</sub>O (Calciumaluminatsulfathydrat), bevorzugt in Anwesenheit von Sulfat im Zement gebildet

gelösten Ionen aufgrund von Konzentrationsunterschieden und der Molekularbewegung sind in allen Porenarten möglich. In den sehr kleinen, stets wassergefüllten Gelporen sind die Transportgeschwindigkeiten jedoch äußerst gering [VDZ 2002].



# Abb. 14: Transportmechanismus der Diffusion für Gase und Flüssigkeiten im Zementstein aufgrund einer Konzentrationsdifferenz [VDZ 2002]

Für die Untersuchungen der Permeation von CO durch Normalbeton wurden je drei Probekörper mit den Dicken 20 mm, 30 mm und 40 mm gegossen. Der Normalbeton wurde nach folgender Rezeptur hergestellt:

CEM 42,1	500g
0/2 Gesteinskörnung	1530g
2/8 Gesteinskörnung	1530g
Wasser	347 g

Aus der Rezeptur ergibt sich ein w/z-Wert von 0,7. Zur Verdichtung wurde der Beton maschinell gerüttelt. Die Formen erhielten eine Folienabdeckung. Nach einem Tag wurden die Proben ausgeschalt und bis zum 7. Tag unter Wasser aufbewahrt. Es schloss sich eine Lagerung bei 20 °C und 65 % Luftfeuchte für vier Wochen an. Abbildung 15 zeigt Beispiele dieser Probekörper.



Abb. 15: Probekörper aus Normalbeton mit 30 mm Dicke

# 4.1.2 Selbstverdichtender Beton

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Hochleistungsbeton, der nur unter dem Einfluss der Schwerkraft entmischungsfrei und ohne an Bewehrungshindernissen zu blockieren nahezu selbstnivellierend fließt, dabei entlüftet und alle Bewehrungszwischenräume sowie die Schalung vollständig ausfüllt. Er weist demzufolge eine sehr fließfähige Konsistenz auf [VDZ 2002]. Selbstverdichtender Beton ist ein noch relativ junges Produkt. Laut [VDZ 2002] wurde er Anfang der neunziger Jahre in Japan vorgestellt und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. "Die besondere Frischbetoneigenschaft wird durch ein erhöhtes Leimvolumen erzielt, in dem die Gesteinskörnungen "schwimmen" können. Der "Leim" (Zementleim bzw. Mehlkornsuspension) muss so zusammengesetzt werden, dass er sowohl eine ausreichende Fließfähigkeit als auch eine erhöhte, entmischungshemmende Viskosität aufweist. Man unterscheidet dabei zwischen dem "Mehlkorntyp" und dem "Stabilisierertyp". Ersterer wird in Deutschland bevorzugt hergestellt." [VDZ 2002]

Gemäß [Beton.org 2018] wurde die Entwicklung des selbstverdichtenden Betons unter anderem durch die Verwendung neuartige Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) ermöglicht. Der Anteil gröberer Gesteinskörnung ist verringert, um die Fließbewegung nicht zu behindern. Nach dem Ausschalen zeigt selbstverdichtender Beton eine nahezu porenfreie Oberfläche. Er ist damit hervorragend als Sichtbeton geeignet [Beton.org 2018]. Als weiteren technischen Vorteil nennt [VDZ 2002], dass selbstverdichtender Beton keine Verdichtungsfehler aufweist. Eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Dünnschliffs von selbstverdichtendem Beton zeigt Abbildung 16.



Abb. 16: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines selbstverdichtenden Beton-Dünnschliffes bei 600-facher Vergrößerung [Schroer 2014]

"Diese Art Beton ist hervorragend für folgende Anforderungen und sich daraus ergebende Anwendungen geeignet:

- Sichtbetonbauteile aufgrund hoher Oberflächenqualität (Stützen, Balken, ...)
- hohe Wandbauteile (mit entsprechender Schalung)
- große Deckenabschnitte
- Betonfertigteilwerke

Weiterhin hat selbstverdichtender Beton mit hohem Zement- und Flugaschegehalt bedingt durch den starken Fließmittelzusatz ein hohes Reduktionsvermögen bezüglich des Wasser-Zement Wertes. Dies ergibt eine höhere Festigkeit als bei üblichen Betonen und lässt andere Bauteildimensionierungen zu." [Wikipedia 2018]

Hinsichtlich auftretender Poren im selbstverdichtenden Beton konnte bei [Thienel 2018/1] recherchiert werden, dass die Angaben über Luftgehalte im Frischbeton von SVB erheblich schwanken, in Deutschland aber meistens ein Luftgehalt von weniger als 2 Vol.-% angestrebt wird, während in internationalen Publikationen von 4 bis 7 Vol.-% Luftporen ausgegangen wird. Da der tatsächliche Anteil an Luftporen im Wesentlichen von den Erfahrungen des Betonherstellers abhängt, empfiehlt [Thienel 2018/1] eine Überprüfung des Luftgehaltes nach der Betonherstellung. Auch weist [Thienel 2018/1] darauf hin, dass zudem der Luftporengehalt zu beachten ist, der zum Beispiel über Luftporenbildner zusätzlich eingebracht wird (LP-Beton). Bei [Höveling 2006] ist zu erfahren, dass bei selbstverdichtendem Beton nur selten Luftporenbildner eingesetzt werden.

Für die Herstellung von je drei Probekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und den Dicken 20 mm, 30 mm und 40 mm wurde eine handelsübliche Mischung verwendet. Diese wurde nach Anleitung mit 2/3 der erforderlichen Wassermenge angemacht, drei Minuten durchgemischt, dann mit der restlichen Wassermenge versehen, weitere zwei Minuten gemischt und unverzüglich in die vorgesehenen Schalungen gegossen. Für die Dauer von fünf Tagen wurden die Schalungen mit Glasplatten abgedeckt, um vor Verdunstung zu schützen. Die Ausschalung der Probekörper erfolgte nach diesen fünf Tagen. Im Weiteren wurden die Proben an der Luft gelagert. Abbildung 17 zeigt als Beispiel die hergestellten Probekörper mit einer Dicke von 40 mm. Bei Einhaltung der Verarbeitungsbedingungen wird dem Beton ein Wasserzementwert (w/z-Wert) von 0,35 zugeschrieben.



Abb. 17: Probekörper aus selbstverdichtendem Beton mit 40 mm Dicke

Ein Technischer Bericht von [VDZ 2008] bescheinigt für diese Betonart eine Porosität inklusive Makroporen von 6,34 % mit einem Anteil an Makroporen von 0,48 %. Dies wurde mittels Quecksilberintrusionsmessung bestimmt.

#### 4.1.3 Porenbeton

Porenbeton wird seit fast 90 Jahren vor allem für den Wohnungsbau verwendet. Aufgrund der gleichmäßig verteilten Luftbläschen wurde er auch Gasbeton genannt. Der Begriff ist heute aber nicht mehr gebräuchlich.

Porenbeton hat eine überwiegend geschlossenzellige Struktur mit Poren von 0,5 bis 1,5 mm Größe [Beton.Wiki 2018]. Hinsichtlich der Porenstruktur und der mineralischen Matrix ist Porenbeton eine besondere Art des Leichtbetons. Seine Herstellung erfolgt laut [VDZ 2002] aus feingemahlenem, guarzhaltigen Sand, Zement und/oder Kalk und Wasser unter Zugabe eines Treibmittels, z. B. Aluminiumpulver. Dieses reagiert mit dem alkalischen Wasser unter Bildung von Wasserstoff, der den Mörtel aufbläht und dabei Makroporen mit einem Durchmesser von 0,5 bis 1,5 mm bildet. Daran schließt sich eine Dampfhärtung im Autoklaven bei rund 190 °C und einem Druck von 12 bar innerhalb von sechs bis zwölf Stunden an. Dadurch bildet sich die druckfeste Mörtelmatrix, die im Wesentlichen aus Calcium-Silicat-Hydraten besteht. "Die Rohdichte dieses porösen mineralischen Baustoffs liegt zwischen 0,30 und 1,00 kg/dm<sup>3</sup> und die Druckfestigkeit zwischen 2,5 und 10,0 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund des hohen Porenvolumens - rd. 80 Vol.-% im unteren Rohdichtebereich - besitzt Porenbeton eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,15 bis 0,20 W/m·K. Aus Porenbeton werden Mauersteine, Bauplatten und großformatige bewehrte Bauteile gefertigt" [VDZ 2002]. Wie aus der bei [VDZ 2002] angegebenen Rezeptur und aus Abbildung 18 ersichtlich ist, enthält Porenbeton im Gegensatz zu anderen Betonarten keine Gesteinskörnungen.

Für die Untersuchungen zur Permeabilität wurden aus einem handelsüblichen Porenbetonstein mittels eines Trockenschneidverfahrens drei runde Probekörper mit einem Durchmesser von 90 mm und einer Dicke von 50 mm geschnitten. Beispiele der Probekörper sind in Abbildung 19 zu sehen.



Abb. 18: Porenbeton – Nahaufnahme [Bernardini 2009]



Abb. 19: Porenbeton-Probekörper der Dicke 50 mm

#### 4.1.4 Zementgebundene Platten

Zementgebundene Bauplatten gibt es in sehr verschiedenen stofflichen Rezepturen für eine Reihe unterschiedlicher Anwendungen. Sie kommen sowohl für Fassaden als auch im Innenausbau zum Einsatz. Neben Faserzementplatten für Fassaden, die unter einem farbigen Anstrich direkt der Witterung ausgesetzt sind, gibt es auch Zementplatten, die als Putzträger für Fassaden dienen. Im Innenausbau werden Zementfaserplatten eingesetzt, wenn extreme mechanische oder Feuchtigkeitsbelastungen vorliegen.

In Zementfaserplatten werden heutzutage zur Armierung meist Fasern aus Holz bzw. Zellstoff, Glas oder Kohlenstoff eingesetzt. Gemäß [Eurobaustoff 2018] bestehen Armierungsfasern für Dach- und Fassadenplatten aus Polyvinylalkohol. Diese Armierungen erhöhen die Bruch-, Zug- und Biegefestigkeit der Zementbauplatten. Dabei erfüllen die Fasern im Grunde dieselbe Funktion wie die Armierung in Stahlbeton. Entsprechend robust und langlebig sind Zementfaserplatten, zudem haben sie gute Schall-, und Brandschutzeigenschaften bei vergleichsweise geringem Gewicht. Durch mikroskopische Poren im Zement sind die Faserzementplatten auch frostbeständig [Siniat 2018].

[Hoeft 2010] informiert über Ausführungsarten der zementgebundenen Platten und unterscheidet grundsätzlich in für den Holzbau geeignete Platten mit eingebundenen Holzspänen (Holzzement) und in die rein mineralischen Platten. Zu letzteren gehören zementgebundene Silikat- bzw. Vermiculitplatten<sup>11</sup> oder Platten mit Glasfaserbewehrung. Diese eignen sich besonders für den Brandschutz sowie für den Einbau in Nassräumen, da sie nicht zur Schimmelbildung neigen. Holzspanplatten können einschichtig oder mehrschichtig sein [AMROC 20118].

Nach [Grimm 2013] bilden den Hauptbestandteil von zementgebundenen Bauplatten meist so genannte Leichtzuschläge [z. B. Blähton- und Recycling-Glasschaumgranulat [Hoeft 2012], wie man sie auch für die Herstellung von Leichtbetonsteinen verwendet. Diese porenreichen Gesteinskörnungen werden mithilfe von Zement als Bindemittel zu einem fest zusammenhängenden Plattenmaterial verbunden. Besonders stabile Platten erhalten oft eine beidseitige Armierung aus Glasgittergewebe und werden zusätzlich noch mit Zementmörtel beschichtet. Neben den glasgitterarmierten Zementplatten gibt es noch andere zementgebundene Bauplatten, die für den Innenausbau von Feuchträumen zum Einsatz kommen – vor allem dampfgehärtete Faserzementplatten. Diese bestehen aus Zement und Zellstoff-Fasern sowie weiteren Füllstoffen. Die Fasern verhindern bei Feuchtebean-

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Vermiculit: selten vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der Silikate und der Ordnung der Schichtsilikate
spruchung das Aufschwemmen der Zementpartikel. Faserzementplatten sind genauso wie glasgitterarmierte Zementplatten feuchte- und schimmelresistent sowie schalldämmend und nicht brennbar.

Als Probenmaterial standen für die Untersuchungen verschiedene zementgebundene Platten zur Verfügung. Aus einer zementgebundenen Leichtbetonplatte mit Sandwichstruktur und beidseitiger Deckschichtarmierung aus alkaliresistentem Glasgittergewebe mit einer Dicke von 12,5 mm, die besonders wasserbeständig ist, wurden drei Proben geschnitten. Eine weitere Qualität, die als Brandschutzplatte verwendet wird, stand in den Dicken von 25 und 60 mm zur Verfügung. Es handelt sich hierbei ebenfalls um zementgebundene, glasfaserbewehrte Leichtbetonplatten mit Sandwichstruktur, die im Kern einen Zuschlag von Glasschaumgranulat enthält. Pro Platte wurden jeweils drei Proben geschnitten. Zusätzlich wurde eine Leichtbetonplatte untersucht, die mit einer Dicke von 10,5 mm nur aus den glasfaserbewehrten Deckschichten (ohne Kern mit Glasschaum) der vorgenannten Plattenqualität besteht. Durch das Trockenschneidverfahren erscheinen die Schnittflächen der Proben etwas verwischt (Abbildung 20). Abbildung 21 zeigt die Originalplatten.



Abb. 20: Proben aus Leichtbetonplatten

Abb. 21: zur Verfügung stehende Leichtbetonplatten

# 4.1.5 Ziegel

Nach [Thienel 2018/2] kann Mauerwerk grundsätzlich als Verbundbaustoff in analoger Weise zum Beton betrachtet werden. Die (kleinformatigen) Mauersteine entsprechen der Gesteinskörnung im Beton und der Mörtel der Betonmatrix. Weiter führt [Thienel 2018/2] aus, dass Mauerwerk im Hochbau eingesetzt wird, es aber wegen der vergleichsweise großen Flexibilität und vor allem wegen der guten bauphysikalischen Eigenschaften überwiegend im Wohnungsbau Verwendung findet. Immerhin sollen mehr als 90 % der Wohnungsbauten in Mauerwerk ausgeführt sein bzw. werden. Aber auch im Industrie- und Verwaltungsbau wird Mauerwerk verwendet. [Thienel 2018/2] gibt einen Überblick (Tabelle 2) über künstlich erzeugte Mauersteine, die nach ihren Ausgangsstoffen eingeteilt werden. Demnach gehören Mauerziegel zu den keramischen Steinen.

keramisch	mineralisch gebunden
Mauerziegel	Kalksandsteine
Weitere Ziegeleierzeugnisse	Porenbeton (Gasbeton)
Feuerfeste keramische Baustoffe	Hüttensteine, Betonsteine
	Leichtbetonbausteine
	Gipsbausteine, Faserzement, Glas

Tabelle 3: Einteilung der künstlichen Steine nach ihren Ausgangsstoffen [Thienel 2018]

Der Markt bietet eine Vielzahl unterschiedlicher Ziegel, von Vollziegel über Ziegel mit Lochungen unterschiedlicher Größe und Geometrie, sowie Ziegel, bei denen die Löcher mit anderen Materialien verfüllt sind.

Hauptbestandteil keramisch gebundener Mauerziegel ist Ton [Thienel 2018/2]. [Hermanus 2018] benennt Ton und Lehm als Grundstoffe für Ziegel. Laut [Thienel 2018/2] haben die Tonminerale eine Blattstruktur mit Durchmesser der Blättchen von 0,1 - 2 µm, Dicke meist weniger als 0,1 µm und können Zwischenschichtwasser anlagern. Durch diese Struktur wird das Quellen und Schwinden der Tone sowie deren gute plastische Verformbarkeit ermöglicht. Weiterhin sind Anteile von gröberen, nicht bildsamen Bestandteilen erforderlich, die das Trocknen erleichtern und das Schwinden verringern. Hier kommen vor allem Minerale wie Quarz, Feldspat, Glimmer und fein verteilter Kalk in Frage. Sie wirken beim Brennen der Masse als Fluss-, Farb- oder Porosierungsmittel und beeinflussen die Standfestigkeit im Feuer. Meistens werden organische Stoffe, wie Sägemehl oder Polystyrolkügelchen als Porosierungsmittel eingesetzt, die im Brennprozess verbrennen und Poren hinterlassen. Von [Hermanus 2018] werden diese Mineralien als Zusätze für die Herstellung von Klinkern genannt. Geformt werden Ziegel in Strangpressen. Schon beim Trocknen verdunstet größtenteils das für die Formgebung benötigte Wasser, weiteres wird im Brennprozess ausgetrieben, bei ca. 120 °C das physikalisch und bei 450 - 600 °C das chemisch gebundene Wasser. Auch strukturell verändert sich die Ziegelmasse beim Brennen. Wie [Thienel 2018/2] schreibt, bilden sich bei etwa 800 °C neue Kristalle, die sich untereinander verflechten, ab etwa 1000 °C setzt das Sintern ein. Dabei erweichen die Tonmineralien an ihren Oberflächen und verschmelzen miteinander. Häufig wird unter Sintern auch nur das Dichtbrennen keramischer Produkte verstanden, durch das die Wasseraufnahmefähigkeit sehr klein wird. Aus diesem Prozess resultieren Klinker mit einer Wasseraufnahmefähigkeit von unter 6 Masse-%. Wie bei [Thienel 2018/2] weiter zu erfahren ist, hängt die Farbe der keramischen Produkte nach dem Brand hauptsächlich vom Gehalt an Metalloxiden ab. Rote Ziegel werden durch einen bestimmten Gehalt an Eisenoxid erhalten, gelbe Ziegel entstehen aus eisenarmen Rohstoffen. Auch spielt die Ofenatmosphäre für die Brennfarbe eine Rolle. Die hellrote Farbe bei Ziegeln erhält man nur in oxidierender (sauerstoffreicher) Atmosphäre. In reduzierender (sauerstoffarmer) Atmosphäre färben sich die Ziegel dunkel (z. B. blauschwarz).

Gemäß [Haus 2018] werden die Ziegel in Typen unterschieden wie beispielsweise Vollziegel, Hoch- und Langlochziegel, verschiedene Vormauer-Vollziegel und diverse Klinker-Arten. Während die weichgebrannten Ziegel im Hausinneren Verwendung finden, sind die härteren Klinker für Fassaden geeignet, wobei letztere seit geraumer Zeit auch im Innenausbau als Eyecatcher genutzt werden. Der Bereich der Rohdichte von Mauerziegel wird von [Thienel 2018/2] mit etwa 0,7 bis 2,0 kg/dm<sup>3</sup> (bei unterschiedlichen Festigkeitsklassen) angegeben.

Für die vorzunehmenden Untersuchungen wurden aus einem handelsüblichen roten Vollziegel aus Ton mit einer Rohdichte von 1,8 kg/dm<sup>3</sup> zwei runde Probekörper mit einer Dicke von 72 mm im Trockenschneidverfahren hergestellt (Abbildung 22). Zwei weitere Probekörper mit einer Rohdichte von 2,089 kg/dm<sup>3</sup> und einer Dicke von 38,3 mm wurden aus einem rotbrennenden Vormauerziegel geschnitten (Abbildung 23). Weiterhin erfolgte die Herstellung von zwei Klinkerproben aus einem schwarzbrennenden Klinker mit einer Rohdichte von 37,5 mm Dicke (Abbildung 24).



Abb. 22: Vollziegel-Proben



Abb. 23: Proben vom rotbrennenden Vormauerziegel



Abb. 24: Proben vom schwarzbrennenden Klinker

### 4.1.6 Gips-Bauplatten

Die Gips-Bauplatten sind aus dem modernen Innenausbau nicht mehr wegzudenken, da sie mit relativ wenig Aufwand viele Innenausbau-Lösungen ermöglichen und sowohl langlebig aber auch leicht wieder rückbaufähig sind. Zudem ist Gips ein natürlicher Rohstoff, der gerade auch unter baubiologischen Gesichtspunkten günstig ist, denn er hat die positive Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen und bei steigenden Temperaturen wieder abgeben zu können. Hieraus leitet sich bereits ein Hinweis auf die Fähigkeit des Materials zur Permeation ab.

Gipsplatten werden zur Herstellung von nichttragenden Innenwänden verwendet und auch als sogenannter Trockenputz. Für einen Wandaufbau werden sie auf eine metallische Unterkonstruktion montiert und der Zwischenraum mit Dämmmaterial verfüllt. Bei der Verwendung als Trockenputz werden die Platten entweder mit Ansetzbinder direkt auf die Rohwand geklebt oder auch auf eine Unterkonstruktion montiert. Gips-Wandbauplatten, die aus homogenem Gips bestehen und deren Platten eine wesentlich größere Dicke aufweisen, lassen sich ohne konstruktive Hilfsmittel zu massiven Trockenbauwänden zusammenkleben und benötigen keinen Putz [Gips 2018].

Je nach Anwendungsfall stehen verschiedene Ausführungen von Gipsplatten zur Verfügung, bei denen aus der Bezeichnung (z. B. Gipsplatte oder Gipsbauplatte) nicht immer hervorgeht, um welche spezielle Platte es sich handelt. Folgende Arten hinsichtlich der Zusammensetzung konnten recherchiert werden:

- Gipskartonplatte
- Gipsfaserplatte
- Hartgipsplatte
- Vliesarmierte Gipsplatte
- Gips-Wandbauplatte

Zum Aufbau von Gipskartonplatten ist bei [Grimm 2018] zu erfahren: "Gipskartonplatten bestehen auch heute noch aus Stuckgips, der beim Brennen von kristallwasserhaltigem Gipsstein (Calciumsulfat-Dihydrat) entsteht, und aus mehreren Papierlagen, die ohne Klebstoff zu Karton verpresst werden. Neben Naturgipsstein kommt als Rohstoff schon seit längerem auch so genannter REA-Gips zum Einsatz. Dieser entsteht in großer Menge in den Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) von Kohlekraftwerken. Es handelt sich um ein Nebenprodukt, das bei der Entschwefelung der Kraftwerksabgase mithilfe von natürlichem Kalk anfällt. Das Geniale: REA-Gips hat die gleiche chemische Zusammensetzung und die gleichen Eigenschaften wie Naturgips. Die Kartonummantelung der Platten umhüllt die Vorder- und Rückseite des Gipskernes sowie beide Längskanten. Die Querkanten sind produktionsbedingt dagegen nicht mit Karton überzogen und geben die Sicht auf den Gipskern frei. Der Karton hat eine entscheidende Bedeutung für die Festigkeit der Produkte, er nimmt zum Beispiel Zugkräfte auf, die auf die Platten einwirken."

Zu den Gipsfaserplatten führt [Grimm 2018] aus: "Die Platten lassen sich von Gipskartonplatten schon auf den ersten Blick leicht unterscheiden, denn sie sind nicht mit Karton ummantelt. Stattdessen enthalten sie in der Regel Zellulosefasern, die als Armierung wirken und dadurch die Stabilität der Platte im Vergleich zu Gipskarton deutlich erhöhen. Die Hersteller von Gipsfaserplatten [...] gewinnen die Zellulosefasern hauptsächlich aus Altpapier. Recycelte Papierfasern, Gips und Wasser werden vermischt und zu Platten gepresst, die keine gesundheitsgefährdenden Stoffe enthalten." Weiterhin wird erwähnt, dass die abgebundene Gipsmasse durch die Fasern eine Bewehrung erhält, die ihre Biege-, Druck- und Scherfestigkeit erhöht und die Platte in sich stabiler werden lässt, so dass sie keines Kartonmantels mehr bedarf. Die Gipsfaserplatten haben durch die Zellulosefasern ähnliche Verarbeitungseigenschaften wie Holzwerkstoffe. Da die Zellulosefasern in Wasser unlöslich sind, beeinflusst die Faserarmierung das Feuchteverhalten der Faserplatten positiv.

Hartgipsplatten haben einen imprägnierten Spezialkern und eine hochwertige Kartonummantelung [Grimm 2018]. Damit könnte man sie auch zu den Gipskartonplatten zählen. Deren Rohdichten von 12,2 kg/m<sup>2</sup> bzw. 12,8 kg/m<sup>2</sup> [Wolf 2015] unterscheiden sich aber deutlich von normalen Gipskartonplatten, die mit 8 bis 9 kg/m<sup>2</sup> angegeben werden. Als Beispiel für die Zusammensetzung einer Hartgipsplatte sei die Information von [Knauf 2018] aufgeführt. Es handelt sich um eine Hartgipsplatte, die als Feuerschutzplatte geeignet ist. Sie ist imprägniert und besteht aus abgebundenem Gips, ummantelt mit Karton. Der Gipskern ist mit geringen Zusätzen an Stärke, Tensiden, Hydrophobierungsmittel sowie Faserzusatz als festigkeits- und feuerwiderstandserhöhende Verstärkung versehen. Teilweise kommen mineralische Zuschlagstoffe hinzu. Bedingt durch den Faserzusatz könnte sie damit aber auch in die Kategorie Gipsfaserplatte gezählt werden.

Gipsplatten mit Kern- und Oberflächenimprägnierung sowie zusätzlicher Glasvliesummantelung stehen speziell für die Anwendung in Räumen mit hoher Feuchtigkeitsbeanspruchung zur Verfügung [Hoeft 2010].

Angaben über die Porosität oder zum Permeationsverhalten konnten nicht recherchiert werden.

Für die Untersuchung der Permeation bei Gipsplatten wurden Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten ausgewählt. So wurden aus einer Gipskartonplatte mit 9,6 mm Dicke zwei Proben geschnitten. Eine Gipsfaserplatte (homogene gipsgebundene Trockenbauplatte mit Papierfasern, werkseitig hydrophobiert) mit 10,5 mm Dicke lieferte drei Proben. Aus einer weiteren Gipsfaserplatte (homogene faserverstärkte gipsgebundene Trockenbauplatte mit Papierfasern und Zusätzen nichtbrennbarer Fasern, werkseitig hydrophobiert) mit einer Dicke von 12,5 mm wurden ebenfalls drei Proben gewonnen. Beispiele der Proben sind in den Abbildungen 25 und 26 zu sehen.



Abb. 25: Proben der Gipsfaserplatten



Abb. 26: Proben aus Gipskarton

# 4.1.7 Holz

[Niemz, Sonderegger 2017] charakterisieren Holz als anisotropen, inhomogenen und porösen Werkstoff, bei dem alle Eigenschaften richtungsabhängig sind, sehr stark variieren und abhängig von den Umweltbedingungen sind. Für die Nutzung des Holzes als Festkörper und für seine Verarbeitung sind Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften, des Langzeitverhaltens und der Alterung fundamental.

Die Permeabilität, also die Durchlässigkeit für Gase und Flüssigkeiten, wird von [Niemz, Sonderegger 2017] als wichtige Eigenschaft des Holzes beschrieben. So macht beispielsweise die geringe Permeabilität Eichenholz für die Weinlagerung geeignet, während andererseits für das Imprägnieren von Holz eine hohe Permeabilität erwünscht ist. Holz, als einziger naturgewachsener Baustoff unter den untersuchten Proben, kann als System miteinander verbundener (kommunizierenden) Kapillaren betrachtet werden (Abbildungen 27 und 28).



Abb. 27: Porensystem des Holzes, Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Fichte (Querschnitt) [Niemz 2005]



Abb. 28: Porensystem des Holzes, Submikroskopischer Aufbau (Zeichnung U. Schmidt) [Niemz 2005]

Neben Span- und Faserplatten werden heute insbesondere Werkstoffe auf Massivholzbasis (Brettschichtholz, Brettsperrholz, Brettstapelelemente) im Bauwesen eingesetzt. Brettschichtholz bzw. lamelliertes Holz (gebräuchlich ist auch die Bezeichnung Leimholz) ist ein Werkstoff, der aus faserparallel miteinander verklebten Brettern oder Leisten besteht. Während beim Schneiden von Voll- oder Massivholz dessen struktureller Aufbau nicht verändert wird, ist die Herstellung von Vollholzwerkstoffen wie Brettschichtholz mit dem Einsatz von Kleb- und Zusatzstoffen verbunden, so dass immer ein Mehrkomponentenmaterial entsteht, bei dem die Struktur des natürlichen Holzmaterials zum Zwecke der Eigenschaftsveränderung gezielt variiert wurde [Niemz, Sonderegger 2017]. Die Autoren weisen aber auch darauf hin, dass die Strukturmerkmale des Brettschichtholzes bzw. lamellierten Holzes, abgesehen von Klebfugen und eventuell auftretenden Stößen, trotzdem mit denen des nativen Holzes identisch sind. Die Klebstofffugen sind sehr dünn und der

Klebstoffanteil am fertigen Produkt beträgt weniger als 1 Prozent [BS Holz 2018]. Brettschichtholz wird überwiegend mit feuchtebeständigen Klebstoffen verklebt, bei Massivholzplatten kommen je nach Verwendungszweck verschiedene Klebstoffsysteme zum Einsatz. Durch das Lamellieren wird im Durchschnitt eine Erhöhung der Festigkeit gegenüber nativem Holz um rund 10 % erreicht [Niemz, Sonderegger 2017].

Proben aus der Baustoffkategorie Holz wurden aus Fichtenbrettern (drei Proben) und Leimhölzern von Fichte und Buche (je drei Proben) geschnitten und untersucht. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen Beispiele dieser Proben.



Abb. 29: Proben aus Fichtenbrett



Abb. 30: Proben aus Leimholz von Fichte (unten) und Buche (oben)

## 4.2 Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung

Um die Permeation von CO durch Baustoffe zu messen, wurde ein zylindrischer Zwei-Kammern-Versuchsstand aus Teflon benutzt (Abbildung 31). Die Kammern liegen vertikal übereinander und werden durch die jeweils zu untersuchende Baustoffprobe getrennt. In der unteren Kammer befand sich vor jedem Versuchsstart Luft. In die obere Kammer wurde ab dem Versuchsstart ein definiertes Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Stickstoff mit einem Gasfluss von 0,2 I/min geleitet, so dass die CO-Konzentration über die Versuchszeit in der oberen Kammer konstant blieb. Die Proben wurden mit CO-Konzentrationen von 10.000 ppm und 1.000 ppm beaufschlagt.

An den Verbindungsstellen Probe und untere sowie obere Kammer wurden zum Abdichten O-Dichtringe aus FKM (Fluorkautschuk) eingesetzt. Die zur Umgebung freiliegenden Schnittflächen der Baustoffproben wurden mit mehreren Lagen Parafilm abgedichtet. Diese dehnbare Verschlussfolie wird um die Seitenfläche der zylindrischen Baustoffprobe gespannt, so dass sich eine eindimensionale Gasströmung im Prüfkörper einstellt. Die Übergänge von den Proben zu den Kammern wurden zusätzlich mit gasdichtem Klebeband verschlossen.



Abb. 31: CO-Versuchsstand mit eingespannter Baustoffprobe

An die untere Kammer war eine Pumpe angeschlossen, die das zu analysierende Gas im Kreislauf förderte. Auf dem Weg durchströmte es die Messkammer eines FTIR (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer), so dass alle zwei Sekunden ein Analysenergebnis erhalten wurde. Der Druck des anströmenden Gases wurde mittels Differenzdruckaufnehmer gemessen, um zu gewährleisten, dass der maximale Eingangsdruck des FTIR nicht überschritten wird. Der Gesamtversuchsaufbau ist in Abbildung 32 dargestellt.

Das Gaslaufschema (Abbildung 33) verdeutlicht nochmals den Aufbau und stellt schematisch die Wege der verschiedenen Gase dar. Die Versuche fanden unter einem Abzug statt. Zur Sicherheit der Experimentatoren wurden kommerzielle CO-Warner neben dem Versuchsplatz unter dem Abzug sowie außerhalb des Abzugs installiert.



Abb. 32: Versuchsaufbau von links nach rechts: FTIR mit davor liegendem Differenzdruckaufnehmer, Pumpen-Umrichter, Gaspumpe, 2-Kammer-Versuchsstand



Abb. 33: Gaslaufschema der CO-Permeationsversuche

Von jedem Baustoff wurden zwei oder drei runde Proben mit einem Durchmesser von 100 mm hergestellt. Jede Probe wurde mindestens zwei Mal dem folgenden Ablauf unterzogen. Die Probe wurde an der Seitenfläche mit Parafilm, ggf. zusätzlich mit gasdichtem Klebeband abgedichtet und dann in den Versuchsstand eingelegt. Runde O-Ringe jeweils unterhalb und oberhalb der Probe dichteten die Kontaktflächen zwischen Probe und Kammermaterial ab. Bedingt durch den Durchmesser der Ringe ergab sich daraus eine effektive Kontaktfläche der Proben für den Permeationsvorgang mit einem Durchmesser von 87 mm. Anschließend wurden die Übergänge zwischen Probe und Versuchskammern mit gasdichtem Klebeband abgedichtet.

Nach dem Start der Messwerterfassung am FTIR wurde die obere Kammer mit dem CO-Stickstoff-Gasgemisch beströmt. Dieser Zeitpunkt galt als Versuchsbeginn. Da das Gasgemisch in der unteren Kammer einer ständigen Analyse unterlag, konnte der Verlauf des Permeationsvorgangs verfolgt werden. Erreichten die Messwerte einen zuvor festgelegten Grenzwert (ca. ein Viertel bis Drittel der anliegenden CO-Konzentration in der oberen Kammer), wurde das Beströmen der oberen Kammer beendet. Öffnen des unteren Kreislaufs durch das Umschalten von Gaswegehähnen ermöglichte die Belüftung der Versuchsapparatur mit Umgebungsluft. Der Versuch war beendet, wenn CO komplett aus dem Gasweg gespült war. Um auch das aus der Probe weiter austretende CO zu entfernen, wurde der Spülprozess fortgesetzt, bis die Probe CO-frei war. Danach war die Versuchsapparatur für den nächsten Durchgang bereit.

## 4.3 Auswertung und Verarbeitung der Messwerte

Die erfassten CO-Konzentrationsmesswerte der Proben eines Baustoffs mit gleicher Dicke wurden gemittelt, das Vertrauensintervall berechnet und beides grafisch dargestellt. Aus den CO-Konzentrationen und dem Volumen des Gaskreislaufs (untere Versuchskammer, Leitungen, Gasvolumen im FTIR und der Pumpe) konnten die jeweiligen im Permeat vorliegenden Teilchenmengen *N* von CO berechnet werden. Diese bezogen auf die Gasdurchtrittsfläche *A* der Baustoffproben sowie die Zeiteinheit *t* ergab die CO-Teilchenstromdichte *j* gemäß Gleichung 6. Durch Umrechnen mit der Molmasse des CO wurde daraus eine CO-Massenstromdichte erhalten. Da es sich bei dem untersuchten Vorgang um einen Permeationsprozess handelt, wurde die Massenstromdichte als Permeationsrate bezeichnet, deren berechnete Werte in  $\mu g/m^2$  s angegeben und über die Versuchszeit grafisch dargestellt.

$$j = \frac{1}{A} \cdot \frac{dN}{dt} \tag{6}$$

Die Berechnung der Diffusionskoeffizienten erfolgte nach der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Methode. Unter Anwendung von Gleichung 4 konnten für das definierte Intervall der konstanten Masseänderung die Diffusionskoeffizienten diekt aus den experimentellen Daten berechnet werden. Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengefasst.

## 4.4 Diskussion der Ergebnisse

An allen untersuchten Baustoffen konnte eine Permeation des CO festgestellt werden. Die Ergebnisse werden nachfolgend im Einzelnen vorgestellt und diskutiert.

## **4.4.1** CO-Permeation an Proben aus Normalbeton

Vom Normalbeton standen je drei Proben in den Dicken 20 mm, 30 mm und 40 mm zur Verfügung. Mit allen Proben wurden jeweils zwei Permeationsversuche bei Beaufschlagung der Probenoberseite mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm durchgeführt, an ausgewählten Proben erfolgte die Untersuchung bei einer CO-Belastungskonzentration von 1.000 ppm (Versuchsplan Tabelle 4).

Bei den Versuchen mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm variierten die Ergebnisse zwischen den Proben gleicher Dicke relativ wenig (Beispiel Abbildung 34). Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen lagen gut beieinander. Das trifft auch auf die Untersuchungen mit 1.000 ppm CO zu, nur scheinen hier größere Abweichungen zwischen den Proben aufzutreten, was aber der feineren Skalierung der Konzentrationsachse geschuldet ist (Beispiel Abbildung 35).

Brohonnummor	Probendicke	Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Frobennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
31	20	2	2
32	20	2	2
33	20	2	1
34	30	2	-
35	30	2	2
36	30	2	1
37	40	2	-
38	40	2	1
39	40	2	1

Tabelle 4: Versuche mit Proben aus Normalbeton



Abb. 34: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an Proben von Normalbeton mit einer Dicke von 20 mm (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)



Abb. 35: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an Proben von Normalbeton mit einer Dicke von 20 mm (B-Test: Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)

Deutlich sichtbar ist, dass bei Anliegen einer höheren CO-Konzentration der Durchbruch durch die Proben schneller erfolgte. Aus allen Messwerten von Proben gleicher Dicke wurden Mittelwerte, Standardabweichung und Vertrauensintervall berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 grafisch dargestellt. Es ist sowohl die indirekte Proportionalität des CO-Stoffstromes zur Dicke der Proben bei gleicher CO-Ausgangskonzentration erkennbar, wie auch die direkte Proportionalität des CO-Stoffstromes zur anliegenden CO-Ausgangskonzentration und damit zum CO-Konzentrationsgradienten.



Abb. 36: Mittelwerte (mit Vertrauensintervall) der durch Permeation in der unteren Kammer erzeugten CO-Konzentrationen bei Normalbetonproben unterschiedlicher Dicke bei Beaufschlagung mit CO-Konzentrationen von 10.000 ppm (obere drei Grafen) und 1.000 ppm (untere drei Grafen)

Zum Vergleich der Konzentrationsverläufe bei unterschiedlich starker Beaufschlagung der Proben mit CO wurde deren Verhältnis gebildet. Es resultiert ein dimensionsloser Faktor, welcher über den Versuchsverlauf grafisch dargestellt wurde (Abbildung 37). Nach Durchbruch des CO und Erreichen einer stationären Phase der Konzentrationsentwicklung in der unteren Kammer stellte sich ein Faktor von 12 bis 13 ein. Das bedeutet, dass bei diesen Proben eine zehnfach höhere CO-Konzentration bei der Permeation zu einer zwölf- bis dreizehnfach höheren Permeatkonzentration führte, wobei eine leichte Dickenabhängigkeit zu beobachten ist. Je dicker die Probe ist, desto höher ist der Faktor.

Ein Diffusionsstrom bleibt bei gegebener Temperatur nur dann konstant, wenn auch der Konzentrationsgradient konstant bleibt. Dies ist in der Praxis aber oft nicht der Fall, da ja gerade die Diffusion stattfindet, um den Konzentrationsunterschied auszugleichen. Das hat die Änderung des Diffusionsstroms zur Folge. Ein zunächst großer Strom verringert sich in dem Maße, in dem der Konzentrationsunterschied abgebaut wird.



Abb. 37: dimensionsloser Faktor (Mittelwert) für das Verhältnis der Permeation unterschiedlich dicken Normalbetonproben bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

Aus den Messwerten der CO-Konzentrationen wurden mittels Gleichung 6 die CO-Stoffströme und daraus die Permeationsraten in der Einheit µg/m<sup>2</sup>s berechnet und über die Versuchszeit grafisch dargestellt. Die Grafen repräsentieren die Ergebnisse der Mittelwertberechnungen aus Untersuchungen gleicher Randbedingungen (Probenart, Dicke, CO-Ausgangskonzentration). In Abbildung 38 sind die Permeationsraten bei Anliegen einer CO-Konzentration von 10.000 ppm zu sehen, in Abbildung 39 die bei 1.000 ppm. Gut erkennbar spiegelt sich in beiden Darstellungen das Verhältnis der jeweils anliegenden Konzentrationsgradienten sowie die Dickenabhängigkeit der Prozesse wider.



Abb. 38: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Normalbetonproben unterschiedlicher Dicke mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 39: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Normalbetonproben unterschiedlicher Dicke mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

Die Berechnung der Diffusionskoeffizienten ergaben die in Tabelle 5 aufgeführten Ergebnisse.

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
20	1,17E-07 m²/s	1,07E-07 m²/s
30	1,28E-07 m²/s	1,02E-07 m²/s
40	1,08E-07 m²/s	0,98E-07 m²/s

#### Tabelle 5: Diffusionskoeffizienten Normalbetonproben

Legt man zugrunde, dass der Diffusionskoeffizient ein Maß für die Beweglichkeit der diffundierenden Teilchen ist, repräsentieren die Ergebnisse (abgesehen von einer kleinen Abweichung bei den Proben mit 20 mm und 30 mm Dicke und 10.000 ppm CO-Belastungskonzentration) einerseits den kleiner werdenden Diffusionsstrom bei zunehmender Dicke der Proben und andererseits auch den geringeren Diffusionsstrom bei geringerer Triebkraft aufgrund einer geringeren CO-Belastungskonzentration.

## 4.4.2 CO-Permeation an Proben aus selbstverdichtendem Beton

Vom dieser Betonart lagen ebenfalls je drei Proben in den Dicken 20 mm, 30 mm und 40 mm vor, die dem gleichen Versuchsprozedere unterzogen wurden. Der Versuchsplan ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Brobonnummor	Probendicke	Anzahl Versuche bei (	ei CO-Konzentration von
Probennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
1	20	3	-
2	20	3	-
3	20	-	-
4	30	2	1
5	30	2	-
6	30	2	-
7	40	2	-
8	40	1	-
9	40	1	-

 Tabelle 6:
 Versuche mit Proben aus selbstverdichtendem Beton

Bei den Versuchen mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm variierten die Ergebnisse, wie auch beim Normalbeton, zwischen den Proben gleicher Dicke relativ wenig. Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen lagen gut beieinander. Die Untersuchung mit 1.000 ppm CO wurde nur an einer Probe vollzogen, da das Ergebnis (Abbildung 40) bestätigte, dass auch beim selbstverdichtenden Beton bei Anliegen einer höheren CO-Konzentration der Durchbruch durch die Proben schneller erfolgte. Aus allen Messwerten von Proben gleicher Dicke wurden Mittelwerte, Standardabweichung und Vertrauensintervall berechnet.

Auf den ersten Blick scheint in den Ergebnissen ein Fehler vorzuliegen, da an Proben mit größerer Dicke (hier 30 mm) eine höhere CO-Konzentration über die Versuchszeit in der Permeatkammer erscheint als bei Proben mit der Dicke von 20 mm. Dieses Ergebnis belegt, dass Beton nach seiner Herstellung über einen langen Zeitraum Veränderungsprozessen, durch Trocknung und die Aus- und Umbildung des Zementgesteins (siehe Kapitel 4.1.1), unterliegt. Die Proben mit der Dicke 20 mm wurden als erste im Versuchsprogramm benutzt, während die anderen ca. acht Wochen später dem Versuchsprozedere unterzogen wurden. Diese hatten offensichtlich nicht mehr so viel Feuchtigkeit im Inneren sowie ein gereiftes Gefüge. Durch Trocknung nehmen das Volumen der leeren Kanäle und deren Vernetzung untereinander zu, was einen größeren Gasfluss zur Folge hat [Tauscher 2005].



Abb. 40: Mittelwerte (mit Vertrauensintervall) der durch Permeation in der unteren Kammer erzeugten CO-Konzentrationen bei Proben von selbstverdichtendem Beton unterschiedlicher Dicke bei Beaufschlagung mit CO-Konzentrationen von 10.000 ppm und einer 30 mm dicken Probe bei 1.000 ppm CO (Test B)

Zum Vergleich der Konzentrationsverläufe bei unterschiedlich starker Beaufschlagung der Proben wurde ebenfalls für die Proben mit 30 mm Dicke das Verhältnis gebildet. Der dimensionslose Faktor stellte sich über die Versuchszeit bei einem Wert von 12 bis 13 ein (Abbildung 41) und spiegelt damit die Verhältnisse beim Normalbeton wider.

Die nach Gleichung 4 berechneten Diffusionskoeffizienten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
20	0,26E-07 m²/s	-
30	0,43E-07 m²/s	0,35E-07 m²/s
40	0,37E-07 m²/s	-

Tabelle 7: Diffusionskoeffizienten selbstverdichtender Beton



Abb. 41: dimensionsloser Faktor für das Verhältnis der Permeation an 30 mm dicken Proben aus selbstverdichtendem Beton bei Beaufschlagung mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm und 1.000 ppm

Aus den Messwerten der CO-Konzentrationen wurden ebenfalls die CO-Stoffströme und daraus die Permeationsraten als Mittelwerte mit Vertrauensintervall berechnet und über die Versuchszeit grafisch dargestellt. In Abbildung 42 sind die Permeationsraten bei Anliegen einer CO-Konzentration von 10.000 ppm zu sehen, in Abbildung 43 die bei 1.000 ppm. Aufgrund der höheren CO-Permeatkonzentrationen bei 30 mm Probendicke gegenüber 20 mm, deren Ursachen zuvor erläutert wurden, nehmen die Grafen der Permeationsraten einen entsprechenden Verlauf. Gut erkennbar spiegelt sich in beiden Abbildungen das Verhältnis der jeweils anliegenden Konzentrationsgradienten wider.



Abb. 42: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Proben aus selbstverdichtendem Beton unterschiedlicher Dicke mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 43: Permeationsraten bei der Beaufschlagung einer 30 mm dicken Probe aus selbstverdichtendem Beton mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

#### **4.4.3** CO-Permeation an Proben aus Porenbeton

Aus Porenbeton wurden drei Proben mit gleicher Dicke von 50 mm geschnitten. Mit allen Proben wurden jeweils zwei Permeationsversuche bei Beaufschlagung mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm durchgeführt, an einer Probe erfolgte die Untersuchung bei einer CO-Konzentration von 1.000 ppm. Der Versuchsplan ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Probendicke		Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Frobennunnner	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
28	50	2	-
29	50	2	1
30	50	2	-

Bei den Versuchen mit einer CO-Ausgangskonzentration von 10.000 ppm variierten die Ergebnisse zwischen den Proben einer Dicke etwas, aber das Material hat auch eine viel porösere Struktur als beispielweise der Normalbeton. Es scheinen örtlich unterschiedliche Porenstrukturen vorhanden zu sein. Die Ergebnisse der Doppelbestimmungen lagen dagegen gut beieinander. Abbildung 44 zeigt den zeitlichen Verlauf des Anstiegs der Permeatkonzentration in der unteren Kammer als Mittelwertgraf mit Vertrauensintervall. Von diesen Proben wurde nur eine der Untersuchung mit 1.000 ppm unterzogen. Die Untersuchungszeit wurde fast bis zum Konzentrationsausgleich in den Kammern

ausgedehnt. Der zeitliche Verlauf der Permeatkonzentration ist in Abbildung 45 zu sehen. Hier ist auch gut erkennbar, dass mit fallendem Konzentrationsgradienten die Permeationsgeschwindigkeit geringer wird. Die Durchbruchzeiten waren bei beiden CO-Konzentrationen sehr schnell. Bei Anliegen von 10.000 ppm CO lagen sie bei einer Minute, bei 1.000 ppm betrug die Durchbruchzeit zwei Minuten.



Abb. 44: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an Porenbetonproben mit einer Dicke von 50 mm (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)



Abb. 45: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an einer Porenbetonprobe mit einer Dicke von 50 mm (Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)

Auch bei diesen Proben erfolgte der Vergleich der Konzentrationsverläufe bei unterschiedlich starker Beaufschlagung der Proben und wurde als dimensionsloser Faktor über die Versuchszeit grafisch dargestellt (Abbildung 46). Nach Durchbruch des CO und Erreichen einer stationären Phase der Konzentrationsentwicklung in der unteren Kammer stellte sich ein Faktor bei einem Wert von etwas über 13 ein. Das bedeutet, dass bei diesen Proben eine

zehnfach höhere CO-Konzentration bei der Permeation, ähnlich wie bei Normalbeton, zu einer dreizehnfach höheren Permeatkonzentration führte.



Abb. 46: dimensionsloser Faktor (Mittelwert) für das Verhältnis der Permeation an 50 mm dicken Porenbetonproben bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

Die Diffusionskoeffizienten wurden nach der beschriebenen Methode ermittelt und sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Diffusionskoeffizien	ten Porenbeton	
Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
50	42,05E-07 m²/s	30,93E-07 m²/s

In den Abbildungen 47 und 48 sind die berechneten Permeationsraten bei Porenbetonproben grafisch dargestellt. Aufgrund viel größerer Porosität im Verhältnis zum Normal- bzw. selbstverdichtendem Beton sind die Werte deutlich größer. Variiert wurde bei diesen Untersuchungen nur die anliegende CO-Konzentration. Auch hier spiegelt sich der Verhältnisfaktor wider. Bei dem Versuch mit 1.000 ppm ist über die lange Versuchszeit sehr gut der nachlassende Stoffstrom durch die Probe aufgrund des schwächer werdenden Konzentrationsgradientens und damit der Triebkraft für die Permeation zu erkennen.



Abb. 47: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Porenbetonproben einer Dicke von 50 mm mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 48: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Porenbetonproben einer Dicke von 50 mm mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

# 4.4.4 CO-Permeation an Proben aus zementgebundenen Platten

Es wurden zementgebundene Platten beprobt, die vor allem als Brandschutzbauplatten geeignet sind. Hier standen zwei verschiedene Dicken bei Platten gleichen Aufbaus zur Verfügung (Probennummern 16 bis 18 und 22 bis 24), des Weiteren eine Platte ohne Glasschaumgranulat (Proben 19 bis 21) sowie eine Platte (Proben 25 bis 27) aus besonders wasserbeständigem Material (siehe 4.1.4). Aus jeder Platte wurden drei Proben geschnitten und dem in Tabelle 10 gezeigten Versuchsplan unterzogen. Während die sich einstellenden Stoffströme bei fast allen Proben bei den Doppelbestimmungen nahezu deckungsgleich über die Versuchszeit verliefen, traten mehr oder weniger große Abweichungen von Probe zu

Drohonnummor	Probendicke	cke Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Probennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
16	25	3	-
17	25	3	1
18	25	3	-
19	10	3	-
20	10	3	-
21	10	3	-
22	60	3	1
23	60	3	2
24	60	3	-
25	12,5	3	-
26	12,5	3	2
27	12,5	3	2

Tabelle 10: Versuche mit Proben aus zementgebundenen Platten

Probe sowohl bei 10.000 ppm CO-Ausgangskonzentration, wie auch bei 1.000 ppm CO-Ausgangskonzentration auf. Dieser Fakt wird durch das Vertrauensintervall der jeweiligen Mittelwertgrafen der CO-Konzentrationen sichtbar gemacht (Abbildungen 49 und 50). Auch hier führt eine höhere CO-Ausgangskonzentration zu schnellerem Durchbruch des CO durch die Proben, während eine größere Dicke den Durchbruch verzögert. Die Leichtbetonplatte mit 12,5 mm Dicke ermöglicht eine etwas schnellere Permeation des CO als die Leichtbetonplatte mit 10 mm Dicke, aber, wie in 4.1.4 beschrieben, unterscheiden sich diese Platten im Aufbau etwas voneinander.



Abb. 49: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an Proben von zementgebundenen Leichtbetonplatten mit Dicken von 10 mm, 12,5 mm, 20 mm und 60 mm (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)



Abb. 50: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an Proben von zementgebundenen Leichtbetonplatten mit Dicken von 12,5 mm, 20 mm und 60 mm (Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)

Der dimensionslose Faktor als Ausdruck des Verhältnisses der Stoffströme bei unterschiedlich großer CO-Ausgangskonzentration zeigte bei den zementgebundenen Leichtbetonplatten eine größere Dickenabhängigkeit (Abbildung 51) als beispielsweise bei den Normalbetonproben auftrat. Auch ist hier die Abhängigkeit indirekt proportional, d. h. je dicker die Probe ist, desto kleiner ist der Faktor. Bei der 12,5 mm starken Platte (etwas andere Zusammensetzung) liegt der Faktor bei etwa 15. Bei der 25 mm dicken Platte ist der Faktor bei etwa 12, wohingegen sich bei der 60 mm starken Platte ein Faktor von etwa 8 einstellt.



Abb. 51: dimensionsloser Faktor (Mittelwert) für das Verhältnis der Permeation bei unterschiedlich dicken zementgebundenen Leichtbetonplatten bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Berechnungen der Diffusionskoeffizienten zusammengefasst.

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
10	2,85E-07 m²/s	-
25	4,31E-07 m²/s	4,02E-07 m²/s
60	1,57E-07 m²/s	1,83E-07 m²/s
12,5	3,97E-07 m²/s	3,16E-07 m²/s

Tabelle 11: Diffusionskoeffizienten zementgebundene Leichtbetonplatten

Die berechneten Permeationsraten sind in den Abbildungen 52 und 53 dargestellt. Aus Abbildung 53 kann abgelesen werden, dass sich bei der zementgebundenen Leichtbetonplatte mit 25 mm Dicke der Stofffluss und damit die Permeationsrate mit Fortschreiten des Konzentrationsausgleichs verringern, während bei der Platte mit 60 mm Dicke aufgrund des wesentlich geringeren Stoffflusses diese Phase noch nicht eingetreten ist, da der Gradient immer noch groß genug ist.



Abb. 52: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Proben unterschiedlicher Dicke aus Leichtbetonplatten mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 53: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von Proben aus Leichtbetonplatten unterschiedlicher Dicke mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

## 4.4.5 CO-Permeation an Ziegelproben

Für die Untersuchungen an Ziegelmaterial kamen braune und rote Klinker sowie roter Vollziegel zur Anwendung. Diese Materialien unterscheiden sich nicht nur in der Zusammensetzung und Rohdichte sondern auch hinsichtlich der Dicke. Der braune Klinker hat eine Dicke von 37,5 mm, der rote eine von 38,3 mm und der Vollziegel ist 72 mm stark. Der Versuchsplan ist aus Tabelle 12 ersichtlich.

Brohonnummor	Probendicke	Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Probennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
40	37,5	2	-
41	37,5	2	1
51	38,3	2	-
52	38,3	2	2
53	72	2	1
54	72	2	1

Tabelle 12: Versuche mit Ziegelproben

Wie schon bei den vorhergehenden Proben stimmten auch bei den Ziegelproben die Stoffströme sowohl bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO-Konzentration als auch bei 1.000 ppm CO-Konzentration bei den Doppelbestimmungen der Proben gut überein. Bei einigen trat ein deckungsgleicher Verlauf auf. Zwischen Proben gleichen Materials war die Übereinstimmung relativ gut. Die Messergebnisse der resultierenden CO-Permeatkonzentrationen sind in den Abbildungen 54 und 55 grafisch dargestellt. Bei den Ziegeln ist eine Abhängigkeit der Permeation vom Material und damit von der Rohdichte erkennbar. Bei den Ziegelmaterialien mit hoher Rohdichte (brauner und roter Klinker 2322 kg/m<sup>3</sup> bzw. 2089 kg/m<sup>3</sup>) ist der Verlauf der Permeation verständlicherweise langsamer als bei dem Vollziegel mit geringerer Rohdichte von 1800 kg/m<sup>3</sup>. Der Einfluss der der Probendicke ist aus diesen Versuchen nicht ableitbar, da die beiden Ziegelproben mit hoher Rohdichte nahezu gleiche Dicke haben und die Proben mit geringerer Dichte fast doppelt so dick sind. Es kann nur ausgesagt werden, dass die Vollziegelproben, obwohl doppelt so dick, schneller vom CO durchdrungen werden.



Abb. 54: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an unterschiedlichen Ziegelproben (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)



Abb. 55: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an unterschiedlichen Ziegelproben (Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)

Mit Fortschreiten der Permeation stellen sich die Stoffströme bei unterschiedlicher CO-Ausgangskonzentration in den in Abbildung 56 gezeigten Verhältnissen (Mittelwerte der Faktoren mit Vertrauensintervall) ein. Bei den Proben aus braunem Klinker ist der CO-Stoffstrom bei Anliegen von einer CO-Konzentration von 10.000 ppm etwa um den Faktor 11 größer als bei einer CO-Konzentration von 1.000 ppm, beim roten Klinker um den Faktor von ca. 12 und beim Vollziegel ist der Stoffstrom beim größeren CO-Ausgangsgradienten etwa 15-fach höher.



#### Abb. 56: dimensionsloser Faktor (Mittelwert) für das Verhältnis der Permeation bei unterschiedlichen Ziegelproben bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

Die berechneten Diffusionskoeffizienten sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
37,5 (brauner Klinker)	2,86E-07 m²/s	2,34E-07 m²/s
38,3 (roter Klinker)	3,66E-07 m²/s	3,59E-07 m²/s
72 (Vollziegel)	15,39E-07 m²/s	11,44E-07 m²/s

## Tabelle 13: Diffusionskoeffizienten Ziegel

Die Grafen der Permeationsraten (Abbildungen 57 und 58) bilden ab, dass mit Fortschreiten des Permeationsprozesses dessen Triebkraft geringer wird und sich der pro Zeiteinheit durch die Fläche gehende CO-Strom proportional dazu verhält. Am deutlichsten ist dies am Vollziegelmaterial sichtbar, da hier der Permeationsprozess am schnellsten läuft.



Abb. 57: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von unterschiedlichen Ziegelroben mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 58: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von unterschiedlichen Ziegelroben mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

## 4.4.6 CO-Permeation an Proben aus Gipsplatten

Für die Permeationsversuche an Gipsplatten wurden Proben aus Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten benutzt. Die Platten haben nicht nur unterschiedliche Dicke, letztere unterschieden sich auch etwas in der Zusammensetzung, wie in Kapitel 4.1.6 beschrieben. Von den Gipsfaserplatten lagen jeweils drei Proben vor, von der Gipskartonplatte zwei Proben. Die Übersicht zum Versuchsplan zeigt Tabelle 14. Gipsplatten galten schon aufgrund früherer Versuche als gut durchlässig für CO. Das konnte mit den hier ausgeführten Untersuchungen bestätigt werden. Die Permeationsprozesse an diesen Platten liefen mit den kürzesten Durchbruchzeiten und den schnellsten Stoffübergängen aller im

Drohonnummor	Probendicke	Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Probennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
10	10,5	3	-
11	10,5	3	-
12	10,5	3	2
13	12,5	3	-
14	12,5	2	-
15	12,5	2	-
56	9,6	2	-
57	9,6	2	-

Tabelle 14: Versuche mit Proben aus Gipsplatten

Projekt untersuchten Baustoffe ab, wobei es von der Stärke der Materialschicht her auch die dünnsten Proben waren. Abbildung 59 zeigt die Mittelwertgrafen (mit Vertrauensintervall) der sich einstellenden CO-Konzentrationen aller Proben pro Probenstärke bei Anliegen einer CO-Konzentration von 10.000 ppm. Es ist anzumerken, dass sich die Proben mit 10 mm und 12,5 mm Stärke von der Zusammensetzung her eher ähneln, wohingegen die 9,6 mm starken Proben aus einfachem Gipsplattenmaterial mit beidseitiger Kartonauflage bestehen. Mit einer Probe aus Gipsfasermaterial wurden Untersuchungen bei Belastung mit 1.000 ppm CO vorgenommen. Einer der Versuche wurde ausgedehnt bis fast zum Konzentrationsausgleich zwischen den Versuchskammern (Abbildungen 60 und 61). Gut erkennbar ist die Abnahme der Triebkraft der Permeation am flacher werden des Grafen. Das schlägt sich ebenfalls im Verlauf der für diese Versuche berechneten Permeationsrate nieder (Abbildung 64).



Abb. 59: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an verschiedenen Gipsplattenproben (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)



Abb. 60: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an Proben einer Gipskartonplatte (BTest: Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)

Das Verhältnis der über die Versuchszeit erhaltenen Permeatkonzentrationen bei Belastung von Gipskartonproben mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO stellt sich mit einem Faktor von etwa 12 ein (Abbildung 62) und folgt damit dem allgemeinen Trend der hier untersuchten Baustoffe.

Als Diffusionskoeffizienten konnten die in Tabelle 15 zusammengefassten Werte ermittelt werden. Diese sind etwas geringer als die von [Vermesi et al., 2015] aus Daten von [Hampson et al., 2013] berechneten, die im Bereich von 17E-07 m<sup>2</sup>/s bis 50E-07 m<sup>2</sup>/s liegen.



Abb. 61: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwert mit Vertrauensintervall) bei der Permeation einer Probe aus Gipsfasermaterial (Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)



Abb. 62: dimensionsloser Faktor für das Verhältnis der Permeation eines Gipsfasermaterials bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
9,6 (Gipskarton)	10,86E-07 m²/s	-
10,5 (Gipsfaser)	7,87E-07 m²/s	6,69E-07 m²/s
12,5 (Gipsfaser)	8,65E-07 m²/s	-

Tabelle 15: Di	iffusionskoeffizienten	Gipsplatten
----------------	------------------------	-------------

Bei einer Belastung der Gipsplattenproben mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm stellte sich jeweils eine Permeationsrate ein, die durch die Grafen in Abbildung 63 repräsentiert werden. Bedingt durch die beobachteten schnellen Stoffübergänge müssen sich zwangsläufig hohe Permeationswerte ergeben, die aber, wie auch sichtbar, mit fortschreitendem CO-Konzentrationsausgleich zwischen den Kammern geringer werden.



Abb. 63: Permeationsraten (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) an verschiedenen Gipsplattenproben bei der Beaufschlagung mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm

Bei der Permeation an Gipskartonproben mit einer Induktionskonzentration von 1.000 ppm CO, die fast bis zum Konzentrationsausgleich zwischen den Kammern durchgeführt wurde, nimmt die grafische Darstellung der Permeationsrate über den Versuchsverlauf die in Abbildung 64 gezeigte typische Form an.



Abb. 64: Permeationsrate (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Beaufschlagung einer Gipsfasermaterialprobe mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

Die Aussagekraft der Grafiken der Permeationsraten soll an einem Beispiel demonstriert werden. Für dieses wurde die in Abbildung 64 dargestellte Grafik aufgearbeitet (Abbildung 65). Es werden die Verhältnisse zu zwei willkürlich gewählten verschiedenen Zeitpunkten T<sub>1</sub> und T<sub>2</sub> betrachtet und die entsprechenden zugehörigen Werte der Ordinate PR<sub>1</sub> und PR<sub>2</sub> abgelesen. In diesem Beispiel heißt das, dass 600 s nach Versuchsbeginn (Zeitpunkt T<sub>1</sub>) eine Permeationsrate PR<sub>1</sub> von 67,68  $\mu$ g/m<sup>2</sup>s bestand sowie 1560 s nach Versuchsbeginn (T<sub>2</sub>) eine Permeationsrate PR<sub>2</sub> von 55,86  $\mu$ g/m<sup>2</sup>s. Also sind in den betrachteten Zeitspannen pro Sekunde Versuchsdauer und pro m<sup>2</sup> Kontaktfläche im Mittel (!) 67,68  $\mu$ g bzw. 55,86  $\mu$ g CO permeiert. Aus dem Produkt der jeweiligen Wertepaare kann die insgesamt bis zum betrachteten Zeitspanne vom Beginn des Versuches bis zum ersten Zeitpunkt T<sub>1</sub> 40,6 mg CO und bis zum zweiten Zeitpunkt T<sub>2</sub> 87,1 mg CO.



Abb. 65: Permeationsrate (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Beaufschlagung von Gipskartonproben mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

## 4.4.7 CO-Permeation an Holzproben

Für die Untersuchungen der CO-Permeation an Holz wurden die in Kapitel 4.1.7 beschriebenen Materialien verwendet. Je Holzsorte lagen drei Proben vor, die nach dem in Tabelle 16 aufgeführten Versuchsplan eingesetzt wurden. Die Proben 42 bis 44 wurden aus einem Fichtenbrett geschnitten, während das Material der Proben 45 bis 47 ein Fichtenleimholz ist. Die Proben 48 bis 50 bestehen aus Buchenleimholz.

Drohonnummor	Probendicke	Anzahl Versuche bei CO-Konzentration von	
Probennummer	mm	10.000 ppm	1.000 ppm
42	22,4	2	1
43	22,4	2	-
44	22,4	2	-
45	17,6	2	1
46	17,6	2	-
47	17,6	2	-
48	18,3	2	-
49	18,3	2	1
50	18,3	2	-

Tabelle 16	Versuche	mit Holzproben
------------	----------	----------------

Da Holz ein naturgewachsener Baustoff ist, liegt die Erwartung nahe, dass Unregelmäßigkeiten im Wuchs größere strukturelle Unterschiede bedingen und damit auch eine größere Schwankungsbreite bei bestimmten Holzeigenschaften hervorrufen, besonders wenn kleinformatige Proben hergestellt werden. Überraschenderweise trifft das auf die

**CO-Permeation** Ergebnisse der Versuche zur nicht Die Messwerte zu. zur größeren Permeatkonzentration unterlagen bei jeweils gleichen Proben kaum Schwankungen als bei den hergestellten Baustoffen. Bei den Doppelbestimmungen an jeweils derselben Probe traten auch sehr häufig fast deckungsgleiche Ergebnisse auf. In der Abbildung 66 werden die Grafen (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) der CO-Permeatkonzentrationen über die Versuchszeit gezeigt.



Abb. 66: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Permeation an verschiedenen Holzproben (Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO)

Wie aus Tabelle 16 ersichtlich ist, wurde nur jeweils eine Probe der verschiedenen Holzarten der Permeation bei 1.000 ppm CO-Konzentration unterzogen, weshalb insgesamt nur drei Ergebnisse vorliegen. Deshalb sind in Abbildung 67 Grafen von Einzelversuchen präsentiert. Das hat zur Folge, dass auch bei der Berechnung der Verhältnisse der bei unterschiedlicher CO-Beaufschlagung erreichten Permeatkonzentrationen nur Grafen von einer Probe je Holzart vorliegen (Abbildung 68). Das schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse etwas ein, aber im Vergleich zu den bei anderen Baustoffen ermittelten Faktoren liegen sie im gleichen Bereich. Am Fichtenbrett stellte sich bei einer Beaufschlagung mit 10.000 ppm CO über die Zeit eine etwa 16-fach höhere Permeatkonzentration gegenüber der Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO ein. Die Leimhölzer lagen mit dem etwa Zwölffachen näher beieinander. Die Diffusionskoeffizienten sind aus Tabelle 17 ersichtlich.

Dicke mm	10.000 ppm CO	1.000 ppm CO
22,4 (Fichte Brett)	0,71E-07 m²/s	0,53E-07 m²/s
17,6 (Fichte Leimholz)	0,37E-07 m²/s	0,31E-07 m²/s
18,3 (Buche Leimholz)	0,45E-07 m²/s	0,39E-07 m²/s

#### Tabelle 17: Diffusionskoeffizienten Holzproben



Abb. 67: zeitlicher CO-Konzentrationsverlauf bei der Permeation an verschiedenen Holzproben (Beaufschlagung mit 1.000 ppm CO)



Abb. 68: dimensionsloser Faktor für das Verhältnis der Permeation bei verschiedenen Holzproben bei Beaufschlagung mit 10.000 ppm und 1.000 ppm CO

Die berechneten Permeationsraten sind in den Abbildungen 69 und 70 dargestellt. Die Grafen nehmen einen ähnlichen Verlauf über die Versuchszeit wie auch bei den anderen untersuchten Baustoffen. Mit Fortschreiten des Permeationsprozesses wird dessen Triebkraft (CO-Konzentrationsgradient) geringer und der pro Zeiteinheit durch die Fläche gehende CO-Strom stellt sich entsprechend kleiner werdend ein.


Abb. 69: Permeationsraten (Mittelwerte mit Vertrauensintervall) bei der Beaufschlagung von verschiedenen Holzproben mit einer CO-Konzentration von 10.000 ppm



Abb. 70: Permeationsraten bei der Beaufschlagung von verschiedenen Holzproben mit einer CO-Konzentration von 1.000 ppm

## **5 ZUSAMMENFASSUNG**

In einer klein skalierten Versuchsapparatur wurde die Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch verschieden dicke Proben der Baustoffe

- Betone und Leichtbetonplatten
- Ziegel
- Holz
- Gipsplatten

untersucht. Zur Erzeugung des CO-Konzentrationsgradienten wurde die zur Beaufschlagung verwendete CO-Ausgangskonzentration zwischen

- 10.000 ppm und
- 1.000 ppm

variiert.

Es konnte festgestellt werden, dass das toxische Gas CO in der Lage ist, durch alle untersuchten Baustoffe zu permeieren. Bei Anliegen einer über die Versuchszeit konstanten CO-Ausgangskonzentration wurde kontinuierlich die sich ausbildende Konzentration des CO-Permeates in der unteren Versuchskammer über die gesamte Versuchszeit mittels FTIR-Spektroskopie gemessen. Die erhaltenen Messwerte wurden grafisch über die Versuchszeit aufgetragen. Wenn mehrere vergleichbare Daten vorlagen, wurden diese zu Mittelwerten verarbeitet und grafisch präsentiert. Unter Annahme einer eindimensionalen stationären Strömung durch die Probekörper wurden den experimentellen Daten aus Diffusionskoeffizienten berechnet. Aus den CO-Konzentrationswerten erfolgte jeweils die Berechnung einer hierfür definierten CO-Permeationsrate, deren Werte über der Versuchszeit grafisch dargestellt wurden.

Es zeigten sich klare Abhängigkeiten des Durchdringungsprozesses vom Material, dessen Dicke sowie dem anliegenden CO-Konzentrationsgradienten. Bezüglich des Materials wurden auch Einflüsse wie Alter der Betonproben (und damit Feuchtegehalt) sowie eventuell vorhandene Schichtstrukturen bei den Leichtbetonplatten und Gipsplatten auf die Permeation sichtbar. Insgesamt kann die CO-Permeation bei den vorliegenden Baustoffproben als relativ schnell erfolgend bewertet werden, da die gemittelten Durchbruchzeiten gegenüber einer CO-Konzentration von 10.000 ppm in den ersten 15 Minuten und bei einer CO-Konzentration von 1.000 ppm nach spätestens 30 Minuten nach CO-Kontakt lagen. Die Untersuchung gegenüber einer CO-Konzentration von 1.000 ppm wurde nicht mit allen Proben vorgenommen. Ein Ranking der untersuchten Baustoffproben bezüglich der gemittelten Durchbruchzeiten zeigen die Abbildungen 71 und 72. Klar ersichtlich ist, dass die Proben aus selbstverdichtendem Beton der CO-Permeation den größten Widerstand bieten, gefolgt von den untersuchten Hölzern. Am leichtesten sind die Gipsplatten zu durchdringen, wobei die dünnste Platte einen größeren Widerstand bietet, als zwei zementgebundene Leichtbetonprodukte. Das wird der beidseitigen Kartonauflage dieser Gipsplatte zugeschrieben. Die 60 mm dicke Leichtbetonplatte bietet aufgrund ihrer Dicke und zusätzlich der Wirkung ihrer Sandwichstruktur ebenfalls eine größere Barriere (zweiter Platz im Ranking). Ist der CO-Durchbruch aber erst einmal erfolgt, wächst die CO-Permeatkonzentration schneller an als bei den im Ranking auf den Nachbarplätzen liegenden Baustoffproben. Dies zeigt sich im Ranking der untersuchten Proben bezüglich der Zeiten bis zum Erreichen einer CO-Permeatkonzentration in der unteren Versuchskammer von 10 % der oberhalb der Proben anliegenden CO-Belastungskonzentration (Abbildungen 73 und 74). Das abweichende Verhalten der 20 mm dicken Probe des selbstverdichtenden Betons (in Abb. 71 Durchbruchzeit nahe bei der 30 mm dicken Probe, in Abb. 73 späteres Erreichen der 1.000 ppm CO-Permeatkonzentration als die 30 mm dicke Probe) ist dem Alter der Probe bei der Untersuchung geschuldet (siehe Kapitel 4.2.2).



Abb. 71: Durchbruchzeiten (Mittelwerte) der untersuchten Baustoffproben bei der Beaufschlagung mit CO-Konzentration von 10.000 ppm



In den Legenden der Abbildungen sind die Baustoffproben zum Teil mit Kurzbezeichnungen angegeben, die folgende Bedeutung haben:

N-Beton	Normalbeton
S-Beton	selbstverdichtender Beton
P-Beton	Porenbeton
B-Platte	zementgebundene Leichtbetonplatte
Gips F	Gipsfaserplatte
Gips K	Gipskartonplatte
Buche LH	Buchenleimholz
Fichte LH	Fichtenleimholz

Die angefügten Zahlen geben die Dicke der Proben in Millimeter an.



Abb. 73: Zeiten (Mittelwerte) bis zum Erreichen einer CO-Permeatkonzentration von 1.000 ppm in der unteren Kammer bei der Beaufschlagung mit CO-Konzentration von 10.000 ppm

Abb. 74: Zeiten (Mittelwerte) bis zum Erreichen einer CO-Permeatkonzentration von 100 ppm in der unteren Kammer bei der Beaufschlagung mit CO-Konzentration von 1.000 ppm

Es darf bei der Bewertung der Ergebnisse nicht unbedacht bleiben, dass diese mit einer relativ kleinen Versuchsapparatur erhalten wurden. Das gesamte Volumen, welches zur Aufnahme des Permeates zur Verfügung stand, entspricht einem hinter der Durchtrittsfläche befindlichen zylindrischen Volumen von gut 0,11 m Tiefe. Dieses gilt über die Versuchszeit als gasdicht. Das bedeutet, dass dort angelangtes CO nicht weiter permeiert, die Konzentration anwächst und der Gradient als Triebkraft für den Permeationsprozess abgebaut wird. In der Realität besteht ein Raum einer Gebäudestruktur, in den CO durch Permeation gelangt, aus Baumaterial, welches eine weitere Permeation und damit die Ausbreitung im Gebäude ermöglicht. Das hat zur Folge, dass zwar die CO-Konzentration in unmittelbar zur CO-Quelle anliegenden Räumen nicht so schnell anwächst, der Gradient deshalb aber hoch bleibt und der Permeationsprozess aufrechterhalten wird.

Diese Ergebnisse machen deutlich, dass es viele Einflussfaktoren auf den Permeationsprozess gibt. In diesem Projekt hatten die Untersuchungen erst einmal orientierenden Charakter und dienten dem Nachweis, dass CO intakte Baustoffstruktur durchdringen kann und zwar in Mengen und Zeiten, die toxikologisch relevant sind. Somit wird deutlich, dass eine Gefahr durch Permeation für alle Bausubstanzen, in denen CO-Quellen auftreten können, besteht. Diese Quellen können zum einen technisch bedingt sein, z. B. durch Heizungsanlagen und –geräte, aber zum anderen auch durch Handlungen von Personen, z. B. suizidale Absichten, vermehrtes Shisha-Rauchen, etc., hervorgerufen werden.

Bedingt durch diese Ergebnisse und den Erfahrungen aus einigen Vorfällen der letzten Jahre wird deshalb empfohlen,

- die Ausrüstung der Einsatzkräfte (auch Rettungsdienst) mit CO-Warngeräten unbedingt durchzusetzen,
- die Ampel-Einsatztaktik zur Abklärung der Ausdehnung einer CO-Kontamination in einer Gebäudestruktur unbedingt anzuwenden,
- einheitliche Regularien f
  ür das Betreiben von Shisha-Bars inklusive der Dimensionierung f
  ür L
  üftungstechnik und deren Einsatz zu schaffen,
- eine verstärkte Aufklärung der Bevölkerung über die CO-Problematik im häuslichen Umfeld zu betreiben und Empfehlung zur Installation von CO-Warngeräten zu geben.
   Gf. ist über die Einführung einer CO-Warnmelderpflicht nachzudenken.

Da die Untersuchungen in diesem Projekt auf eine Auswahl reiner Baustoffe beschränkt waren, wird die Fortsetzung der Untersuchungen zur CO-Permeation an kompletten

Wandaufbauten empfohlen, um die Einflüsse weiterer an Wänden vorkommender Materialien abzuklären.

# 6 LITERATUR

## [AMROC 2018]

AMROC Baustoffe GmbH Magdeburg: AMROC-Panel B1 / Zementspanplatte – Produktbeschreibung, <u>https://www.amroc.de/de/zementspanplatte-amroc-panel-b1/produktbeschreibung.html</u>, am 20.12.2018

[AK CO 2017]

Arbeitskreis Kohlenmonoxid: Verbraucher unterschätzen tödliche Gefahr durch Kohlenmonoxid, <u>https://www.presseportal.de/pm/129124/3821644</u>, am 01.06.2018

[Arnold 2009]

Arnold, C.: Kinetischer Durchmesser und Molekularsieb-Effekt, Dr. Arnold Chemie-Beratung, URL: <u>http://www.arnold-chemie.de/2009/07/kinetischer-durchmesser-und-molekularsieb-effekt/</u>, am 06.11.2018

[Barrer 1941]

Barrer, R. M.: Diffusion in and through solids, New York, The Macmillan Company Cambridge, England, At the University Press 1941

[Baunetz 2018]

Baunetz\_Wissen: Beton, URL: https://www.baunetzwissen.de, am 06.011.2018

[Beese et al. 2014]

Beese, H.; Grählert, W.; Schulz, S.: Entwicklung von Permeationsmesstechnik zur Bestimmung der für Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) kritischen Gasdurchlässigkeit, Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Forschungsprogramm des BM für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014

[Bernardini 2009]

Bernardini, M.: Porenbeton-Nachaufnahme,

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aerated autoclaved concrete - detail.jpg, am 21.11.2018

[Betonkonkret 2018]

Betonkonkret: Betonporen, Nachschlagewerk, https://betonkonkret.de, am 04.06.2018

[Beton.Wiki 2018]

Beton.Wiki: Ein Lexikon der InformationsZentrum Beton GmbH., <u>https://www.beton.wiki</u>, am 04.06.2018

[Beton.org 2018]

Beton.org Informationsplattform des InformationsZentrums Beton: Was ist Beton? Beton - ein faszinierender Baustoff, <u>https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/was-ist-beton/</u>, am 06.11.2018 [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

[Bosold, Grünewald 2016] Bosold, D.; Grünewald, A.: Was ist Beton?, InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath, 09/2016 www.beton.org

[BS Holz 2018] BS Holz: Brettschichtholz – Herstellung, <u>https://www.brettschichtholz.de/brettschichtholz-bs-holz/herstellung/mn\_43528</u>, am 10.12.2018

[Chang et al, 1992] Chang, J.; Guo, Z.: The Effects of Building Features on Air and Pollutant Movement. Building Research Journal, 1(1), pp. 55-63, 1992

[Chemie 2018] Chemie: Darcy [Einheit], <u>http://www.chemie.de/lexikon/Darcy\_%28Einheit%29.html</u>, am 29.11.2018

[Destatis 2018]

Statistisches Bundesamt: Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland - Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation – 2016, https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/ Gesundheit/Todesursachen/Todesursachenstatistik.html,

[DFV 2017]

Deutscher Feuerwehrverband: Feuerwehr warnt vor Gefahr durch Kohlenmonoxid, <u>http://www.feuerwehrverband.de</u>, am 01.06.2018

[Emig, Klemm 2017] Emig, G.; Klemm, E.: Chemische Reaktionstechnik, Springer-verlag GmbH Deutschland, 2017

[Eurobaustoff 2018]

Eurobaustoff: Faserzementplatten für Dach oder Fassade, <u>https://www.eurobaustoff.de/bauen-</u> wohnen-leben/profi-informationen/baumaterialien/platten-und-trennwaende/faserzementplatten-fuerdach-oder-fassade/, am 20.12.2018

[Fehlhaber 1994]

Fehlhaber, Th.: Zum Eindringverhalten von Flüssigkeiten und Gasen in ungerissenen Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 445, Beuth Verlag GmbH 1994

[FeuerTrutz 2017]

FeuerTrutz: Statistik der Brandtoten in Deutschland 2015, <u>https://www.feuertrutz.de/statistik-der-brandtoten-in-deutschland-2015/150/52637/</u>, am 01.06.2018

#### [Freude 2006]

Freude, D.: Molekülphysik, Vorlesungsskripte, Kapitel "Größe, Masse und Kinetik der Moleküle, Version Oktober 2006, Universität Leipzig, URL: <u>https://home.uni-leipzig.de/energy/</u>, am 06.11.2018

#### [FVA 2009]

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA): Zukunft Holz, Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale, Kapitel 01 Markterschließung, Ökonomie, <u>http://www.fva-bw.de/publikationen/zukunft\_holz/zh\_k01.pdf</u>, am 31.07.2018

#### [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

#### [Geisenhanslüke 2015]

Geisenhanslüke, C.: Unterscheidungsmerkmale für Beton, in OPTERRA Betonhandbuch, Herausgeber OPTERRA GmbH Leipzig, 2015, <u>https://www.opterra-crh.com/</u>, am 12.11.2018

#### [Gips 2018]

Bundesverband der Gipsindustrie e. V.: Gips-Wandbauplatten, Arten & Komponenten, http://www.gips.de/loesungen/gips-wandbauplatten/baustoffe/arten-komponenten/, am 03.12.2018

#### [Gräf, Grube 1988]

Gräf, H.; Grube,H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser, <u>https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/</u> <u>Fachaufsaetze/1981 1990/Betontechnischer Bericht 86-88 Verfahren zur Pruefung der</u> <u>Durchlaessigkeit von Moertel und Beton gegenueber Gasen und Wasser.pdf</u>, am 05.09.2018

#### [Grimm 2013]

Grimm, R.: Trockenbau: Zementgebundene Bauplatten trotzen dem Wasser, baustoffwissen, 29.08.2013, <u>http://www.baustoffwissen.de/wissen-baustoffe/baustoffknowhow/haus-garten-wegebau/trockenbau/feuchteresistenter-trockenbau/</u>, am 30.11.2018

#### [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

[Haus 2018] Haus-Info: Ziegel und Klinker – trotz uralter Herkunft noch modern?, <u>http://www.haus-infos.net/bauen/klinker.php</u>, am 30.11.2018

[Hermanus 2018] Hermanus, M.: Klinker und Ziegel – wo liegt der Unterschied?, Hausjournal, https://www.hausjournal.net/klinker-ziegel-unterschied, am 30.11.2018

[Hoeft 2010] Hoeft, M.: Zementgebundene Bauplatten - Trockenbau im Feuchtraum, bba Fachmagazin für Architekten, Planer und Bauingenieure 10.06.2010, <u>https://www.bba-</u> <u>online.de/fachartikel/innenausbau/trockenbau-im-feuchtraum/</u>, am 27.11.2018

## [Hoeft 2012]

Hoeft, M.: Trockenbau im Feuchtraum, dds online, <u>https://www.dds-</u> online.de/gestaltung/werkstoffe/trockenbau-im-feuchtraum/, am 20.12.2018

#### [Höveling 2006]

Höveling, H.: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB), Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover, 2006, <u>https://www.baustoff.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Veroeffentlichungen/Heft04-Hoeveling-SVB.pdf</u>, am 21.11.2018

[Holzbau Deutschland 2018]

Holzbau Deutschland: Bund Deutscher Zimmermeister, Lagebericht und Statistiken, https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user\_upload/eingebundene\_Downloads/ Statistiken\_2018.pdf, am 31.07.2018

[Jacobs et al. 1994]

Jacobs, f.; Mayer, G.; Wittmann, F. H.: Hochpermeable, zementgebundene Verfüllmörtel für SMA Endlager, TECHNISCHER BERICHT 92-11, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich, 1994

#### [Jenkins 2018]

Jenkins, J. J.: Foto Betonstruktur (Betonfoto1), https://pixabay.com/de/beton-struktur-alt-grau-braun-380249/, am 18.07.2018

#### [Keil 1999]

Keil, F.: Diffusion und Chemische Reaktionen in der Gas/Feststoff-Katalyse, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999

## [Keshishian, et al., 2012]

Keshishian, C.; Sandle, H.; Meltzer, M.; Young, Y.; Ward, R.; Balasegaram, S.: Carbon Monoxide from Neighbouring Restaurants: the Need for an Integrated Multi-agency Response. Journal of Public Health, 34(4), p. 477–482, 2012

#### [Knauf 2018]

Knauf: Diamant-Hartgipsplatte 12,5 mm, Knauf Gesellschaft m.b.H., <u>http://www.knauf.at/sortiment/</u> <u>diamant-hartgipsplatte-125-mm.html#showtab-tab\_31447\_3</u>, am 04.12.2018

#### [LFZG 2018]

Landesforschungszentrum Geothermie: Permeabilität, http://lfzg.rz.hs-offenburg.de/tl\_files/lfzg\_th/ Uploads/Permeabilitaet.pdf, am 20.11.2018

#### [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

[Mersmann1986]

Mersmann, A.: Stoffübertragung, Springer-VerlagBerlin Heidelberg 1986

#### [Meyer 2007]

Meyer, L.: Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen 2007, Aachener Beiträge zur Bauforschung des IBAC, Bd. 14, Hrsg. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac)

#### [Moore 1990]

Moore, W. J.: Grundlagen der Physikalischen Chemie, Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York 1990, ISBN 3-11-009941-1

[Niemz 2005]

Niemz, P.: Educational Material: Physik des Holzes, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe, Zürich 2005

## [Niemz, Sonderegger 2017]

Niemz, P.; Sonderegger, W.: Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, ISBN 978-446-44526-0, Carl Hanser Verlag München 2017

#### [Ollivier et al. 1995]

Ollivier, J. P.; Massat, M.; Parrott, L.: Parameters influencing transport characteristics. In: Performance Criteria for Concrete Durability. Rilem Report 12, Hrsg. J. Kropp, H. K. Hilsdorf, 1995, S. 33-96, zitiert in: Tauscher, F.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Gaspermeabilität von Mörtel und Beton, Universität Duisburg Essen, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Heft 8, Shaker Verlag, Aachen 2005

#### [Ortmann 2016]

Ortmann, R.: Untersuchungen zur Adsorption und Desorption von Aldehyden und Aminen im Spurenbereich, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen, 2016 [Paschmann et al. 1995]

Paschmann, H.; Grube, H.; Thielen, G.: Prüfverfahren und Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen in Beton sowie zum chemischen Widerstand von Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 450, Beuth Verlag GmbH 1995

[Physik 2018]

Cosmos indirekt - Physik für alle: Perm [Einheit], <u>https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Perm (Einheit)</u>, am 29.11.2018

[Pyrek, 2015]

Pyrek, R.: Kohlenstoffmonoxid (CO) – die unsichtbare Gefahr!, Brandschutzforum Austria, Aprilsymposium, 2015, <u>www.co-vergiftung.at</u>, erhalten am 27.02.2018

[Reimann 2001]

Reimann, S.: Untersuchungen zur Oberflächendiffusion in porösen Medien, Dissertation im Fachbereich Chemie der Universität Hannover, 2001

[Schroer 2014]

Schroer, A.: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines selbstverdichtenden Beton-Dünnschliffes bei 600-facher Vergrößerung, <u>https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:REMSVB600x.jpg</u>, am 20.11.2018

[Siniat 2018]

Siniat: Zementplatten von Siniat, <u>https://www.siniat.de/de-de/trockenbau-a-z/zementplatten</u>, am 29.11.2018

[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

[Specht 2014] Specht, E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Vulkan Verlag Essen 2014

[Spektrum 2018]

Spektrum.de: Lexikon der Geowissenschaften – Klüftigkeit, https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/klueftigkeit/8478, am 29.11.2018

[Tauscher 2005]

Tauscher, F.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Gaspermeabilität von Mörtel und Beton, Universität Duisburg Essen, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Heft 8, Shaker Verlag, Aachen 2005

## [Thienel 2011]

Thienel, K.-Ch.: Herbsttrimester 2011, Werkstoffe I Allgemeine Grundlagen - Stoffkennwerte, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, <u>https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/masterstudium</u>, am 21.11.2018

## [Thienel 2018/1]

Thienel, K.-Ch.: Frühjahrstrimester 2018, Selbstverdichtender Beton, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, <u>https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/masterstudium</u>, am 21.11.2018

#### [Thienel 2018/2]

Thienel, K.-Ch.: Frühjahrstrimester 2018, Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens Mauersteine und Mörtel, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium, am 21.11.2018

## [Thienel 2018/3]

Thienel, K.-Ch.: Frühjahrstrimester 2018, Faserbeton, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, <u>https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/masterstudium</u>, am 21.11.2018

## [Thienel 2017]

Thienel, K.-Ch.: Wintertrimester 2017, Normalbeton Hochfester Beton Hochleistungsbeton Ultrahochfester Beton, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/masterstudium, am 21.11.2018

#### [Thienel 2018/4]

Thienel, K.-Ch.: Frühjahrstrimester 2018, Festbeton, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, <u>https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium</u>, am 21.11.2018

## [Thienel 2018/5]

Thienel, K.-Ch.: Frühjahrstrimester 2018, Frischbeton, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, <u>https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium</u>, am 21.11.2018

#### [Thilenius et al., 1925]

Thilenius, R.; Pohl, T.;: Über die Diffusion von Gasgemischen durch Baumaterial, 1925; erschienen in Angewandte Chemie Vol. 38, 2006

## [VDZ 2002]

Verein Deutscher Zementwerke e. V.: Zement-Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2002, ISBN 3-7640-427-4

#### [VDZ 2008]

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Forschungsinstitut der Zementindustrie: Technischer Bericht TB-BTe B2128-5-A/2008, Bestimmung des Gesamtporenvolumen von Probekörpern durch

Quecksilberintrusion; Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstands von Probekörpern mit dem CFD-Verfahren, Düsseldorf 2008

[Vermesi et al., 2015]

Vermesi, I.; Walker-Ravena, C.; Rein, G.: Carbon Monoxide Diffusion through Porous Walls: A Critical Review of Literature and Incidents, Fire Protection Research Foundation, 2015

[Weber 2014]

Weber, R.: Guter Beton, Ratschläge für die richtige Betonherstellung, Verlag Bau+Technik GmbH, Erkrath, 2014, ISBN 978-3-7640-0586-3, Betongefuege.jpg in <u>https://www.beton.wiki</u>, am 20.11.2018

[Weh 2002]

Weh, B.: Permeationseigenschaften von Polydimethylsiloxan-Membranen in Abhängigkeit von der Netzbogenlänge, Dissertation zur Erlangung des naturwissenschaftlichen Doktorgrades der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg 2002

[Wiegleb 2016]

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

[Wikipedia 2018]

Wikipedia: Selbstverdichtender Beton, <u>https://de.wikipedia.org/wiki/Selbstverdichtender Beton</u>, am 21.11.2018

## [Witte 2015]

Witte, F.: Gefährliche Glut, Süddeutsche Zeitung am 20. September 2015, <u>https://www.sueddeutsche</u>.<u>.de/gesundheit/kohlenmonoxid-vergiftung-darum-kann-grillen-drinnen-toedlich-sein-1.2650238</u>, am 10.04.2018

[Wolf 2015]

Wolf, U.: Hartgipsplatten: Auf die harte Tour, Ausbaupraxis, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2015, <u>https://www.ausbaupraxis.de/hartgipsplatten-auf-die-harte-tour</u>, am 30.11.2018

[Zeit, 2014]

https://www.zeit.de/hamburg/stadtleben/2014-12/hamburg-harburg-gasunfall, abgerufen 12.12.2018

[Zürcher, Niemz 2011]

Zürcher, E.; Niemz, P.: Holz: Struktur und Eigenschaften (Skript zur Vorlesung), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,