

2 Grundlagen

Im Folgenden wird, im für die durchgeführte Forschung notwendigen Maß, auf die hier ausschlaggebenden grundlegenden Aspekte des jeweiligen wissenschaftlichen Feldes eingegangen. Beginnend mit den vielseitigen Eigenschaften der Materialgruppe der mineralisierten Schäume und Schaumbetone (Kap. 2.1), werden danach eingehend die Natur von flüssigen Schäumen sowie Schaumstrukturen im Allgemeinen diskutiert (Kap. 2.2, S. 17). Daraufhin werden im Text die Materialcharakteristiken von Zementstein dargestellt (Kap. 2.3, S. 31), um zum Ende des vorliegenden Hauptkapitels dessen rheologischen Eigenschaften im frischen Zustand zu erörtern (Kap. 2.4, S. 40). Im naturwissenschaftlich-technischen Bereich als allgemein bekannt vorauszusetzende Zusammenhänge werden, aus Gründen einer synthetischen Darstellung des Problemfeldes, nicht dargestellt. Für weitergehende Ausführungen wird auf die zitierte Literatur verwiesen.

2.1 Mineralisierter Schaum und Schaumbeton

Im weiteren Verlauf werden die unterschiedlichen bekannten Typen von mineralisiertem Schaum bzw. Schaumbeton bzw. Schaummörtel im technischen sowie im forschungsgeschichtlichen Zusammenhang rezensiert. Insbesondere werden die unterschiedlichen Herstellungsmethoden und die werkstofftechnologischen Grundlagen erläutert. In gewissen Umfang wird dabei ergänzend auch auf eigene Untersuchungen zurückgegriffen.

Der Begriff Schaumbeton oder Porenleichtbeton¹² beschreibt ein zementgebundenes Material ohne grobe Gesteinskörnung¹³, dessen Bindemittelmatrix mit geeigneten Mitteln, in höherem Maße als bei Luftporenbeton¹⁴, künstlich und gleichmäßig porosiert¹⁵ wurde [1, 4, 5, 23, 25, 26]. Im Gegensatz zu dampfgehärteten Porenbeton verfestigt Schaumbeton durch Zementhydratation. Daneben weisen die beiden Materialtypen aufgrund von Unterschieden in der Mikrostruktur voneinander abweichende Festbetoneigenschaften auf [27]. Ver-

12 In älteren Veröffentlichungen wird das gleiche Material oft auch als Porenbeton oder Zellenleichtbeton bezeichnet [2, 21].

13 Aus diesem Grund kann korrekterweise hier nicht von einem „Beton“ gesprochen werden. Angebracht wäre daher der Begriff Schaummörtel [22]., auch wenn sie in der zurückgezogenen DIN 4164 als Feinkornbetone bezeichnet wurden [23].

14 Porengehalte von lediglich 4 % bis 5 %, wie für Luftporenbeton üblich, sind nicht Gegenstand der Untersuchungen [24].

schiedene Schaumbetontypen lassen sich am einfachsten nach ihrer Trockenroh-dichte bzw. Mischungszusammensetzung unterscheiden. Dies kann mit sinkender Dichte nahezu parallel zur aufsteigend chronologischen bzw. forschungsge-schichtlichen Einordnung erfolgen. Darüber hinaus ist die angewandte Herstel-lungsmethode prägend für Typ und Eigenschaften von Schaumbeton [28, 29].

2.1.1 Dichte und Zusammensetzung

Die in dieser Arbeit analysierten Literaturquellen lassen, wie weiter unten dar-gestellt, eine gewisse Gleichförmigkeit hinsichtlich des jeweils behandelten Roh-dichtebereichs erkennen. Dieser Umstand soll zu einer Kategorisierung der Tex-te genutzt werden und im Weiteren zur Konzentration auf die, mit der vorliegen-den Arbeit weitgehend übereinstimmenden, Materialtypen dienen. Die häufig Begrenzung auf einen Bereich mit einer Variationsbreite zwischen 100 kg/m^3 und 500 kg/m^3 begründet sich, wie auch in dieser Arbeit geschehen, wahrschein-lich in der Fokussierung auf ein Optimierungsziel sowie in praktischen wie her-stellungstechnologischen Randbedingungen (vgl. Abb. 7) [3, 28, 30]. So ist selbst unter Laborbedingungen eine gewisse Schwankungsbreite der Materialei-genschaften unvermeidbar [31].

Dichtekategorisierung

Auch wenn eine exakte Abgrenzung nicht vollständig möglich ist, liegt die höchste wissenschaftlich besprochene Trockenroh-dichte bei ca. 1800 kg/m^3 . Wenn auch normativ Leichtbeton bereits bei Dichten von unter 2000 kg/m^3 als solcher gelten kann [22], sind die Rohdichten zwischen 1800 kg/m^3 und 2000 kg/m^3 wohl wissenschaftlich wie wirtschaftlich für die Realisierung als Schaumbeton weniger relevant. Die im Rohdichtebereich (Tab. 1) von 1400 kg/m^3 und 1800 kg/m^3 hergestellten Schaumbetone sind oft bewehrt und finden im Hausbau bei Gründungen sowie im Wandbereich ihren Einsatz, wer-den aber auch für Kunstbauwerke verwendet. Diese Materialkategorie findet aufgrund der Schwindproblematik fast ausschließlich außerhalb Europas Ver-wendung [3, 28, 30, 32–36]. Betreffende Rohdichten sind hierzulande durch, in vielerlei Hinsicht leistungsfähigere, normierte gefügedichte und haufwerkspori-ge Leichtbetone abgedeckt [25, 37].

In einer zweiten Kategorie von Forschungsarbeiten können, neben dem eben er-wähnten Maximalwert, als untere Grenze des Rohdichtebereichs meist Werte

15 DIN EN 206:2017-07: Künstliche Luftporen (englisch: entrained air) sind „mikrosko-pisch kleine Luftporen, die während des Mischens – im Allgemeinen unter Verwen-dung eines oberflächenaktiven Stoffes – absichtlich im Beton erzeugt werden“. Sie sind „typischerweise kugelförmig oder nahezu kugelförmig und haben Durchmesser von $10 \text{ }\mu\text{m}$ bis $300 \text{ }\mu\text{m}$ “. Im Gegensatz dazu sind Lufteinschlüsse (englisch: entrapped air) „Luftporen, die unbeabsichtigt in den Beton gelangen“ [25].

von ca. 800 kg/m^3 festgestellt werden (Tab. 1). Diese Werkstoffe finden ebenfalls im konstruktiven Bereich Verwendung, daneben werden sie aber auch zum Verfüllen, als sogenannter Dämmer, im Hoch-, Tief- und Bergbau eingesetzt [3, 7, 28, 38–40]. Im Folgenden werden Materialien, deren Trockenrohdichten im Bereich von $800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{\text{dry}} \leq 1400 \text{ kg/m}^3$ liegen, als frische bzw. feste Schaummörtel bezeichnet und nur die darüber liegende als Schaumbetone (Tab. 1).

Eine dritte Kategorie von Veröffentlichungen beschäftigt sich vornehmlich mit Materialien deren Trockenrohdichten ρ_{dry} in etwa im Bereich $400 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{\text{dry}} \leq 800 \text{ kg/m}^3$ liegen (Tab. 1). Sie werden als Füllmaterialien, aber auch zu Dämmzwecken eingesetzt [3, 28, 41–43]. Materialien dieses Dichtebereiches werden hier als mineralische (frisch) bzw. mineralisierte (fest) Schäume eingeordnet (Tab. 1).

Tab. 1: Rohdichtebereiche und verwendete Bezeichnungen für Materialien mit Schaumzusatz und Gesteinskörnung $D < 2 \text{ mm}$.

Rohdichtebereich [kg/m^3]	Bezeichnung
1400 – 1800	Schaumbeton
800 – 1400	Schaummörtel
400 – 800	Mineralisierter Schaum
< 400	Leichter mineralisierter Schaum

Alle bezüglich der Rohdichte darunter liegenden Materialien dieses Typs werden den leichten mineralisierten Schäumen zugerechnet (Tab. 1). Dieser in der vorliegenden Arbeit vornehmliche behandelte Rohdichtebereich wird erst in neueren Veröffentlichungen verstärkt verfolgt. Der Einsatz ist bisher auf füllende und dämmende Zwecke beschränkt [6, 44, 45]. Neben der Minimierung der Rohdichten konzentrieren sich aktuelle Forschungen im Bereich hochporöser Betone auf eine Festigkeitssteigerung sowie Sachwindreduzierung mittels granulometrischer Optimierung oder Fasereinsatz; dies gilt gleichermaßen für den weiter unten beschriebenen Infraleichtbeton [46–48].

Zusammensetzung

Die genannten Grenzen ergeben sich auch aus der jeweils typischen Zusammensetzung der Materialien. So werden, neben dem entsprechend der Materialdichte sich ändernden Porenanteil, feine Gesteinskörnungen typischerweise hinunter bis zu Trockenrohdichten von ca. 800 kg/m^3 verwendet. Reine mineralisierte Schäume unter 800 kg/m^3 verfügen oftmals zwar auch noch über einen Feinkornanteil, sind aber konstruktiv aufgrund ihrer niedrigen Festigkeit nur noch in Ausnahmefällen interessant. Im Bereich der leichten mineralisierten Schäume kommen meist nur noch Zement und Zusatzstoffe zum Einsatz.

Leichtzuschlagbeton mit schaummodifizierter bzw. porosierter Matrix

Daneben existiert die Mischform eines Leichtzuschlagbetons mit schaummodifizierter bzw. porosierter Matrix, letzter oft auch Infrabeton oder Leichtzuschlag-schaumbeton genannt [1, 49, 50]. Ein wichtiger Unterschied bezüglich der Entwurfskriterien von Infrabeton und schaummodifizierten Leichtzuschlagbeton besteht hinsichtlich des Matrixanteils in Bezug auf das zur Verfügung stehende Zwickelvolumen zwischen den Gesteinskörnern. Wenn das Matrixvolumen dem Zwickelvolumen entspricht oder gar Selbiges unterschreitet, kann von einem modifizierten haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) gesprochen werden¹⁶, andernfalls entspricht die Struktur mehr einem konstruktiven Leichtbeton.

Die Materialdichten beider Leichtbetonarten sind stark von der Roh- und Schüttdichte sowie deren Verhältnis zueinander bzw. der Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnung abhängig [51]. Ihr rechnerisches Trockenroh-dichte-Minimum liegt bei ca. 300 kg/m³ (vgl. Formel 2.2). Infraleichtbeton wird in Dichten unter 800 kg/m³ hergestellt [49]. Unter Inkaufnahme von Festigkeits-minderungen können Rohdichten bis unter 450 kg/m³ erreicht werden.

Eine Entwurfsmöglichkeit für haufwerksporigen Leichtbeton mit schaummodifizierter Bindemittelmatrix und vollständig gefülltem Zwickelporenraum besteht auf Basis einer Zielroh-dichte wie folgt (Formel 2.1 und 2.2) [52].

$$\phi_{MS} = \frac{\rho_{G,s}}{\rho_G} \quad (2.1)$$

$$\rho_{MS} = \rho_{LZS} - \rho_{G,s} \quad (2.2)$$

ϕ_{MS} : Anteil der modifizierten Bindemittelmatrix bzw. des mineralisierten Schaumes.

$\rho_{G,s}$: Trockenschüttdichte der verwendeten Gesteinskörnung.

ρ_G : Trockenroh-dichte der verwendeten Gesteinskörnung.

ρ_{MS} : Rohdichte der modifizierten Bindemittelmatrix als Eingangsgröße für einen gesonderten Entwurf eines mineralisierten Schaums (siehe dazu Kapitel 4.1).

ρ_{LZS} : Entwurfsroh-dichte des Leichtzuschlagbetons mit schaummodifizierter Bindemittelmatrix.

Wird kein vollständig gefüllter Zwickelporenraum angestrebt, so kann die Roh-dichte des mineralisierten Schaums entsprechend der Reduzierung seiner Zugabe, unter Beibehaltung der Entwurfsroh-dichte des Leichtzuschlagbetons, erhöht werden.

2.1.2 Herstellungsweisen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den geschlossenen Porenanteil im Zementstein signifikant zu erhöhen (Abb. 6). Weit verbreitet, wenn auch meist nicht in

¹⁶ Die DIN 1520 spricht von „LAC mit aufgeschäumter“ Matrix, ohne den verschiedenen Arten von porosierter Matrix und den unterschiedlichen Schaumvolumina Rechnung zu tragen. Der LAC mit porosierter Matrix wird lediglich im Zusammenhang mit Grundwerten für den Feuchtegehalt erwähnt [37].

reiner Zementmatrix, ist die chemische Luftporenerzeugung im fertig gemischten Beton, etwa durch Aluminiumpartikel. So entstehen Poren zwischen 0,5 mm und 1,5 mm in der Bindemittelmatrix [4]. Der mit dieser Technik meist hergestellte, sogenannte Porenbeton erfordert einen hoch technisierten industriellen Prozess, im Zuge dessen das Material in einem Autoklav nachbehandelt wird. Dies hat eine Beschränkung der Bauteilgröße zur Folge [1, 4, 53]. Des Weiteren können unter Verwendung grenzflächenaktiver Stoffe Luftblasen auf mechanischem Wege in eine Leim- oder Mörtelmischung durch einen intensiven Mischprozess eingebracht werden. In der Regel werden bei diesem Verfahren Luftporenbildner nach DIN EN 934-2 eingesetzt [54, 55]. Die Obergrenze des auf diese Weise erreichbaren Porengehalts liegt bei etwa 20 % bis 30 % des Betonvolumens [2]. Die auf diese Weise erzeugten Luftporen sind relativ groß und vergleichsweise instabil [56]. Alternativ dazu können unter Bindemittelleime geschlossenzellige Schäume gemischt werden, die zuvor aus einer Dispersion von Wasser und grenzflächenaktiven Stoffen, sog. Schaumbildnern, vorgefertigte wurden (weiter dazu Kapitel 4.2.5, S. 67). Hier ist der Verlust von Luftporen während des Mischens vergleichsweise gering [57]. Daneben ist es möglich, unter Zuhilfenahme der gleichen Schaumbildner, einen Bindemittelleim in einem speziellen Schaumgenerator direkt aufzuschäumen [1, 6]. Der physikalisch aufgeschäumte Beton zeichnet sich im plastischen Zustand durch einen stabilen und gleichmäßig feinporigen Mörtel aus. Die mechanische Aufschäumung im Mischer produziert dagegen einen verhältnismäßig instabilen Schaum mit einer unregelmäßigen Porenstruktur [58]. Ebenfalls denkbar ist auch ein Einmischen von synthetischen Schaumstoffpartikeln oder vorgefertigten Hohlkugeln aus Kunststoff oder Glas [59–61].

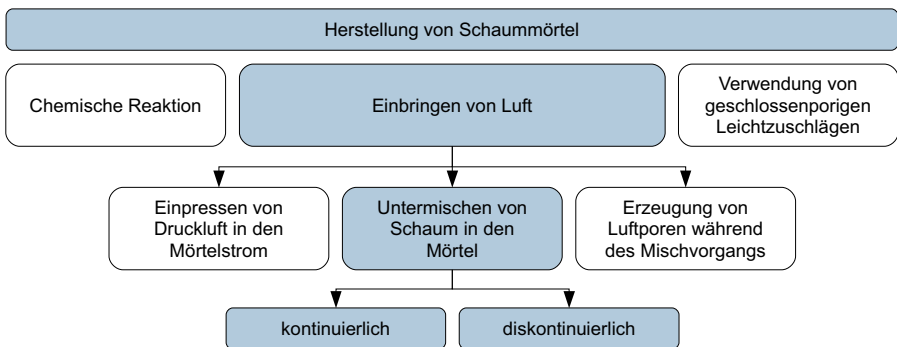


Abb. 6: Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Schaumbetonherstellung, sinngemäß nach [7]¹⁷.

¹⁷ In [7] finden sich zu den einzelnen Porosierungsmöglichkeiten von Beton, Mörtel bzw. Leim aufschlussreiche Systemskizzen aus [62].

2.1.3 Dichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Viele Festkörpereigenschaften von porositäten und hochporositäten Betone lassen sich, wie beim Leichtbeton, auf seine Rohdichte zurückführen [37]. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse einer im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Metastudie zum Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und der Rohdichte von Schaumbeton. Im Diagramm sind rein zementöse Mischungen gemeinsam mit mineralisierten Schäumen bzw. Schaumbetonen mit Zusatzstoffanteilen (meist Steinkohleflugasche) wiedergegeben. Höhere Dichten wurden zudem unter Einsatz von Sand erreicht. Die Daten der ausgewerteten Publikationen werden jeweils als Einzelwert dargestellt, auch wenn diese in den allermeisten Fällen bereits auf statistischen Auswertungen mehrerer Ergebniswerte basieren. Wenn eine Spannweite von Werten angegeben wurde, ist jeweils der Mittelwert dargestellt. Nicht dargestellt sind hingegen Leichtbetone mit schaummodifizierter Bindemittelmatrix oder Leichtzuschlagschaumbetone (Kap. 2.1.1, S. 14) [51, 57].

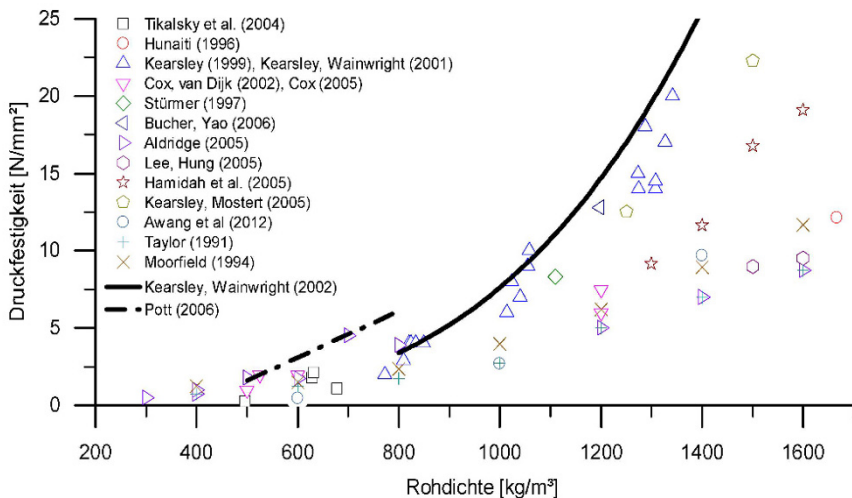


Abb. 7: Zusammenhang zwischen 28-Tage-Druckfestigkeit und Rohdichte von „Schaumbeton“ als Ergebnis einer Metastudie [6, 7, 33, 34, 38, 40, 42, 63–72].

Als durchgehende Funktion ist in Abbildung 7 ein von KEARSLEY und WAINWRIGHT 2002 vorgeschlagener funktionaler Zusammenhang wiedergegeben (Formel 2.3) [72]. Ihre Untersuchungen konzentrierten sich auf die Optimierung des Flugaschenanteils in Schaumbetonmischungen mit Rohdichten zwischen 800 kg/m^3 und 1500 kg/m^3 [72].

$$f_c = 39,6 (\ln(t))^{1,174} \cdot (1 - \varphi_t)^{3,6} \quad (2.3)$$

f_c : Druckfestigkeit von Schaumbeton.

t : Zeit nach dem Ausschalen.

φ_t : Gesamtporosität nach 365 Tagen, hier rechnerische mit Formel 4.7 (S. 89) ermittelt.

Die im Rahmen der Metastudie errechnete mittlere Zunahme der Druckfestigkeit zwischen 7 Tagen und 28 Tagen ist 24 % [69, 73–75]. In neuere Forschungen zu sogenanntem „UHPC-Schaumbeton“ unter Anwendung der aus der Hochleistungsbetontechnologie bekannten Methoden¹⁸ konnten in den Rohdichtebe-
reich über 800 kg/m³ weitere signifikante Festigkeitssteigerungen erreicht werden [76].

Auch die Wärmeleitfähigkeit steht in Abhängigkeit zur Rohdichte des mineralisierten Schaumes. Diesbezüglich sind in Abbildung 8 weitere Ergebnisse der genannten Metastudie dargestellt.

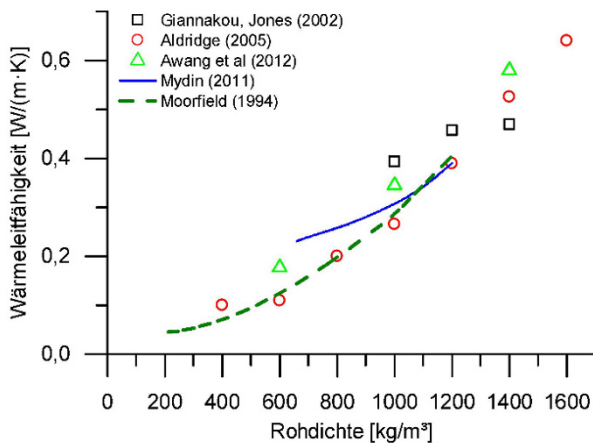


Abb. 8: Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte von „Schaumbeton“ als Ergebnis einer Metastudie [67, 69, 71, 77, 78].

2.2 Flüssiger Schaum

Schaum ist die Dispersion eines Gases in einer kontinuierlichen Phase, die im Allgemeinen flüssig oder fest sein kann [79, 80]. Die DIN EN ISO 862 definiert Schaum als Gesamtheit der Gaszellen, die durch dünne Flüssigkeitsfilme ge-

¹⁸ Wie reaktive Zusatzstoffe, Verringerung des Wasserzementwertes, optimierte Kornzusammensetzung.

trennt sind¹⁹ und durch Aneinanderreihen von Blasen gebildet werden, wobei ein verhältnismäßig großes Gasvolumen²⁰ in einer Flüssigkeit dispergiert ist [82]. Thermodynamisch stellen flüssige Schäume instabile Mehrphasensysteme mit nur einer beschränkten Persistenzdauer dar, die sich nie in einem metastabilen Gleichgewichtszustand befinden. Aufgrund der unterschiedlicher gleichzeitig ablaufender Prozesse sind sie ständigen Formationsänderungen unterworfen (Kap. 2.2.3, S. 23) [17, 83, 84].

Dem in dieser Arbeit untersuchten mineralischen Schaum liegt ein wässriger Schaum²¹ zugrunde (vgl. bzgl. der verwendeten Herstellungsmethodik Kapitel 2.1.2, S. 14 und 4.2.5, S. 67). Die hier aufgezeigten grundlegenden Zusammenhänge für flüssige Schäume gelten für beide der genannten Schaumssysteme.

2.2.1 Multiskalare Struktur

Schäume können multiskalar betrachtet werden. Sie bestehen zunächst aus der Summe ihrer Ausgangsstoffe, die dann etwa wie in Kapitel 4.2.5.2 beschrieben durch Energieeintrag zu durch Lamellen umgebenden Blasen geformt werden. Eine Vielzahl dieser miteinander verbundenen oder nicht verbundenen Blasen bilden dann das System Schaum (Abb. 9, Beschreibung der Entwicklungsdynamik in Kapitel 2.2.2, unten).

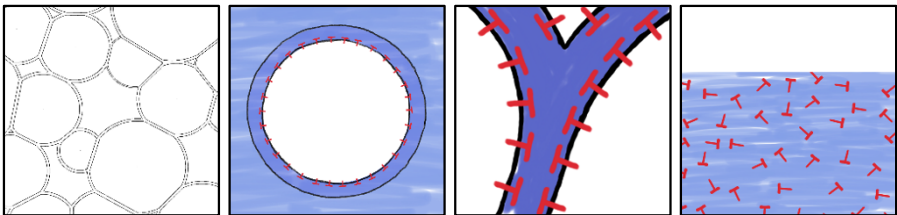


Abb. 9: Multiskalenbetrachtung von wässrigem Schaum. Von links nach rechts: Schaum, Blase, Lamelle, Gemisch aus Wasser und oberflächenaktivem Stoff mit hydrophoben sowie -philen Resten (dargestellt als „T“, Kapitel 2.2.4, S. 29).

Schäume sind makroskopisch homogen, bei auf Blasengröße aufgelöster Betrachtung sind sie jedoch strukturiert. MATTHES (2005) zufolge sollten sie daher

-
- 19 Offenporige poröse Materialien verfügen über keine disperse Phase und sind daher im engeren Sinne keine Schäume [81].
 - 20 Allgemein werden Schäume mit hohem dispersen Gasanteil als kolloidal agglomerierte Gasdispersionen bezeichnet, im Gegensatz dazu Dispersionen mit geringem Gasvolumenanteil als Gasemulsionen [17].
 - 21 Für eine Einführung in die Geschichte der Schaumtheorie wird die Einleitung der Publikation „Foam and foam films: theory, experiment, application“ von Exerowa und Krugljakov empfohlen [85].

global als Dispersion betrachtet werden, in deren Inneren sich auf mikroskopischer Ebene Grenzflächenphänomene sowie mikrofluidische Vorgänge der kontinuierlichen oder in bestimmten Fällen²² auch dispersen flüssigen Phase unterscheiden lassen. Das Verhalten des Gesamtsystems ist auf die Wechselwirkung der genannten und im Weiteren aufgegliedert beschriebenen Ebenen miteinander zurückzuführen [17].

Blasenebene

Schaumblasen sind von Flüssigkeitslamellen umhüllte Gaseinschlüsse. Die Lamellen haben auf beiden Seiten²³ eine Grenzfläche mit einem Oberflächenfilm [86]. Infolge der Grenzflächenspannungen herrscht im Inneren der Gasblase gegenüber dem Umgebungsdruck ein um den Laplace-Druck höherer Druck (Formel 2.5 und 2.6, S. 25) [83, 87]. Die Wanddicken der Blasen von wässrigem Schaum betragen ca. 4 nm bis 600 nm. Bei der Schaumbildung entstehen Blasenpopulationen verschiedener Größenverteilungen²⁴ [17, 88]. Die Blasengröße reichen bei feinen Schäumen von 0,1 mm bis 2,0 mm, sie können bei groben Schäumen bis zu zehnmal größer sein [83].

Schaumebene

Die Struktur des Schaumes wird durch die Balance zwischen dem Blaseninnendruck und der Oberflächenspannung der kontinuierlichen Phase nach dem thermodynamischen Minimalflächenprinzip bestimmt [89, 90]. Die Blasengröße selbst hat auf das physikalische Verhalten keinen direkten Einfluss und stellt lediglich das Maß der Strukturiertheit des wässrigen Schaums dar [91-93]. Besonders komplex und noch nicht vollständig verstanden sind hier insbesondere die Wechselbeziehungen der einzelnen dispersen Blasen zueinander sowie auch die Interaktion zwischen deren Grenzflächenstrukturen (eine Übersicht der Effekte: Kapitel 2.2.3, S. 23). Erschwerend kommt hinzu, dass weder eine explizite experimentelle Aufnahme sowie Auswertung dieser Phänomene im dreidimensionalen Raum bekannt sind [17, 94]. Die räumliche Verteilung der Phasengrenzflächen und die Schichtbreiten der kontinuierlichen Phase sind direkt von der Gasverteilung abhängig [17]. Sie bestimmen in komplexer Weise insbesondere die mechanische Stabilität die Haltbarkeit, das Fließverhalten von Schäumen [17].

²² Vgl. Abb. 9, zweites Bild von links.

²³ Ein Hohlraum ist ein Gaseinschluss in einer Flüssigkeit und verfügt nur über eine Grenzfläche [17].

²⁴ Sogenannte monodisperse Schäume mit nur einer Blasengröße und einer gleichmäßigen Verteilung der Phasen im Raum sind äußerst selten und treten meist nur bei geringen Gasanteilen auf. Ihre Herstellung ist aufgrund der vielen nichtlinearen dynamischen Faktoren, die zur Schaumbildung führen und sich einer vollständigen Kontrolle entziehen, sehr komplex [17].

Gasanteil und Schaumtypen

Wichtigstes Charakteristikum zur Beschreibung der Struktur eines Schaumes ist sein Gasanteil Φ (Formel 2.4) [6, 7, 95]:

$$\phi = \frac{V_g}{V_g + V_{fl}} \quad (2.4)$$

V_g : Volumenanteil der Gasphase.
 V_{fl} : Volumenanteil der flüssigen Phase.
 ϕ : Gasanteil des Schaums (Porosität).

Bei einem Gasanteil von unter ca. 52 % (primitives Gitter einer monodispersen Kugelpackung) sind die einzelnen Blasen größtenteils voneinander unabhängig und interagieren nicht miteinander [6]. Bis zu einer Volumenkonzentration des Gases von ca. 74 % (dichteste monodisperse Kugelpackung), haben die Gasblasen ein kugelförmiges Aussehen und bilden einen sogenannten Kugelschaum in Form eines Haufens selbstständiger Blasen (Kap. 6, S. 159). Durch schaumzerstörende Prozesse (Kap. 2.2.3, S. 23) entstehen über die Zeit Polyeder verschiedener Flächenformen und Größen, die wesentlich stabiler und nicht mehr selbstständig sind (Abb. 10). Der Volumenanteil des Gases liegt dann bei mindestens 74 %. Aus geometrischen Gründen sind die Blasen dann nicht mehr kugelförmig und durch sehr dünne, fast ebene Flüssigkeitslamellen getrennt, die sich im Idealfall in einem Winkel von 120 ° treffen (Abb. 14) [83], aber in den Bereichen der verbindenden Flüssigkeitskanäle stärkere Krümmungen aufweisen (Abb. 14, S. 27) [17, 88, 96].

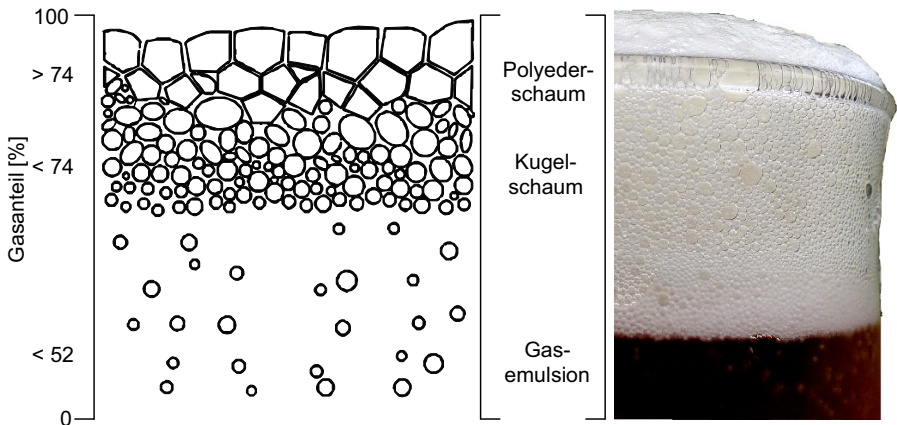


Abb. 10: Schaumtypen nach Struktur und Gasanteil. Links: Schematische Darstellung nach [97]. Rechts: Schaumkrone eines Bieres²⁵ (vgl. Kapitel 2.2.2).

Weisen Schäume eine breite Porengrößenverteilung auf, können diese auch bei Gasanteilen von über 74 % eine kugelförmige Struktur haben. Dabei werden kleinere Gaseinschlüsse in den Zwischenräumen der größeren Blasen möglich [80]. Oftmals ist also die Blasenverteilung nicht eindeutig bestimmbar, zudem sie einer starken örtlichen und zeitlichen Varianz unterliegt. In der Regel treten beide Formen innerhalb eines Schaumkörpers auf [17]. Im Falle von multidispersen Schäumen liegt eine polyedrische Struktur meist ab 90 % bis 95 % Gasanteil vor. Ihre Bildung beginnt jedoch schon bei einem Gasanteil wenig über 74 %. Diese sich daraus ergebende unregelmäßige Struktur wird auch zufällige Wabenstruktur genannt [85].

Blasensysteme sowie Kugelschäume werden aufgrund dickerer Lamellen, deren Zwischenräume mit der innerlamellaren Flüssigkeit gefüllt sind, zu den nassen Schäumen gezählt. Polyederschäume gehören zur Gruppe der trockenen Schäume und zeichnen sich durch einen hohen Gasvolumenanteil aus [6, 98].

Technische Relevanz des spezifischen Gewichts

Wie dargestellt, wird die Struktur eines Schaumes maßgeblich durch seinen Gasanteil bestimmt. Im Umkehrschluss lässt das, in der Praxis relativ einfach zu bestimmende, spezifische Gewicht Rückschlüsse über den Anteil der kontinuierlichen Schaumphase²⁶ zu, und kann als ein entscheidendes wie geeignetes Prüfkriterium für wässrigen Schaum zur Mineralisierung angesehen werden [99]. Die geeignete Dichte des wässrigen Schaums für die Mineralisierung ist häufig Gegenstand wissenschaftlicher und technischer Diskussionen [2, 6, 9]. Schwere Schäume zeigen eine stärkere Neigung zur Drainage und sind fließfähiger [50]. Jedoch wird über sie relativ mehr Wasser in das Gesamtsystem des mineralisierten Schaums eingebracht, mit den entsprechenden Folgen für die Mikrostruktur der Bindemittelmatrix (Kap. 2.3, S. 31 und 5.2.3, S. 126). Leichtere Schäume sind dagegen steifer und neigen teils aufgrund der höheren Konzentration des Schaumbildners zu Nachschäumen, was eine Steuerung des Porengehaltes erschweren kann [50]. Sie sind zudem aufgrund ihres niedrigeren Wassergehaltes und damit dünneren Lamellen weniger robust gegenüber nicht schauminhärenten, den Zerfall begünstigenden Faktoren, wie etwa Partikelsaugen (Kap. 2.2.3, Abb. 16, S. 28). Schaumrohdichten für die Mineralisierung im Bauwesen liegen in fast allen Fällen zwischen 60 kg/m³ und 80 kg/m³ [2, 6].

26 Proportional dazu kann entsprechend die enthaltene Menge an Schaumbildner bestimmt werden.

2.2.2 Schaumbildung und Herstellungstechnik

a) Schaumbildung

Bevor sich ein grenzflächenaktiver Stoff (Detergens) bei ausreichend hoher Konzentration an der Grenzfläche einer Flüssigkeit anlagert, verteilen sich die Moleküle bei niedriger Konzentration zunächst vereinzelt und gleichmäßig (Abb. 9, S. 18, rechts). Bei stetiger Erhöhung der Konzentration bildet sich in einem dynamischen System eine einschichtige (monomolekulare) Grenzschicht von gleichmäßig ausgerichteten Molekülen mit nach außen gerichtetem hydrophoben Rest in Form eines Films an der Oberfläche des Stoffgemisches [100]. Die Moleküle mit hydrophilen und hydrophoben Molekülabschnitten stören die Bindungen zwischen den einzelnen Wassermolekülen und stabilisieren die Phasengrenze zwischen Flüssigkeit und umgebenden Gas. Bei Energieeintrag in das Flüssigkeitsgemisch kann die Phasengrenzfläche durch Überwindung der Oberflächenspannkraft mittels Lufteinschlüsse vergrößert werden [8, 83]. Sobald Gas die Grenzfläche des Fluids überwindet, bilden sich Adsorptionsschichten; dort sind die hydrophoben Reste der grenzflächenaktiven Stoffe der Luft und deren hydrophile Gruppe der Wasserphase zugekehrt (Abb. 9, S. 18, zweite v. r.). So formt sich eine kugelförmige Luftblase eingehüllt in eine doppelschichtige Lamelle. Zwischen den eigenständigen Blasen befindet sich zu diesem Zeitpunkt viel Wasser. In diesem instabilen Zustand werden die sich an der Oberfläche bereits befindlichen Gasblasen durch neu aufsteigende verdrängt (Abb. 10, oben) [62, 98]. Die Blasen verlieren dadurch mit der Zeit ihre kugelige Form und gehen in einen stabileren Zustand über, indem sie eine polyedrische zusammenhängende Struktur bilden. Wenn die Vergrößerung der Phasengrenzfläche schneller vonstattengeht, als der Austritt der entstandenen Gasblasen sowie deren Vereinigung zu instabilen größeren Blasen (Kap. 2.2.3, S. 23), kann der dispergierte Gasvolumenanteil soweit vergrößert werden, dass man von einem Schaum spricht [17]. Das Volumen dieses Zweiphasenmediums hängt unter anderem vom Flüssigkeitsvolumen, der eingetragenen Energie, der Art des Eintrags und der Temperatur ab [83].

Die Schaumbildungsfähigkeit einer grenzflächenaktiven Substanz wird über das gebildete Schaumvolumen unter definierten Bedingungen²⁷ bewertet [83]. Die Schaumbildung wird aus chemischer und physikalischer Sicht durch die Reinheit und die Konzentration des grenzflächenaktiven Stoffes beeinflusst [103]. Die optimale Konzentration zur Herstellung eines lange stabilen Schaums ist sowohl nach unten wie auch nach oben begrenzt und kann nicht durch einfache (additive) Konzentrationserhöhung verbessert werden. Es handelt sich hierbei um eine synergistische, aber auch teilweise antagonistische Wirkung²⁸ [104].

²⁷ Messverfahren z. B. in [101, 102].

b) Herstellungstechnik

Die meisten Schäume werden aus Flüssigkeitsgemischen hergestellt, wobei das angewandte Verfahren die Eigenschaften des Schaumes ebenso beeinflusst wie die verwendeten Ausgangsstoffe. Die für die Blasenbildung erforderliche Energie kann über Erwärmung²⁹ durch chemische Reaktion³⁰ oder durch mechanisches Dispergieren der Gasphase in die flüssige Phase eingebracht werden [17]. Daneben kann im sogenannten Kondensationsverfahren (oder Aerosolverfahren) durch Kompression sowie anschließender Druckminderung einer mit Gas gesättigten Flüssigkeit das gelöste Gas in Blasenform zur Freisetzung gebracht werden³¹ [83].

Bei der Schaumherstellung mit einem Schaumgenerator werden die drei Ausgangsstoffe Wasser, Luft und oberflächenaktiver Stoff in diesem zusammengeführt. Die Konzentration des Detergens kann durch Änderung des Verhältnisses von Wasser- und Luftstrom angepasst werden. In einer Belüftungsstrecke wird Druckluft unter die Oberfläche des Flüssigkeitsgemisches gebracht. Dies kann unter Verwendung eines Mischers geschehen sowie durch Einleiten des Gases in das aufzuschäumende Fluid über Kapillaren durch Gazen oder Lochplatten (Abb. 11).

Im Anschluss an die Belüftungsstrecke befindet sich eine, zumeist austauschbare, poröse Membran, mit deren Hilfe die Porengrößenverteilung homogenisiert wird (Abb. 12, unten) [50, 83, 105]. Über Hindernisse im Rohr oder eine Verkleinerung des Durchmessers wird in diesem Bereich die Flüssigkeit beschleunigt und die Schaumblasen durch die so eingetragenen Scherkräfte geteilt [106].

2.2.3 Stabilität und Zerfall

Die Schaumbildungsfähigkeit und Stabilität hervorgerufen durch grenzflächenaktive Stoffe sind nicht identische Eigenschaften, auch wenn sie eine gewisse gegenseitige Abhängigkeit voneinander aufweisen [100, 107]. Schäume sind, wie alle Stoffsysteme bestehend aus mehreren nicht mischbaren Phasen, thermodynamisch instabil und neigen zur Phasenseparation. Sie verändern ständig ihre innere Struktur, da das Oberflächenpotenzial einem Minimum zustrebt und bestrebt ist, die Grenzfläche zwischen diesen Phasen zu minimieren und die dort gespeicherte Energie abzugeben. Das daraus resultierende, quasi metastabile

28 So liegt ein synergistischer Effekt vor, wenn die Wirkung eines Stoffes innerhalb einer Mischung höher ist, als jene, die für eine gleiche Wirksamkeit, durch eine lineare Kombination voneinander getrennt betrachteter Komponenten entstehen würde. Im Gegensatz zeigt sich bei antagonistischer Wirkung, ein schwächerer Effekt, als jener, welche durch eine lineare Kombination entstehen würde [104].

29 Z. B. Blasenbildung beim Verdampfen.

30 Z. B. Wasserstoffreaktion von Aluminium in alkalischem Milieu.

31 Z. B. mit Kohlensäure angereichertes Mineralwasser.

bile³², zweiphasige Gefüge wird zwar durch grenzflächenaktive Substanzen stabilisiert, die Zerstörung der Schaumstruktur beginnt dennoch sofort nach dessen Bildung [17, 108, 109].

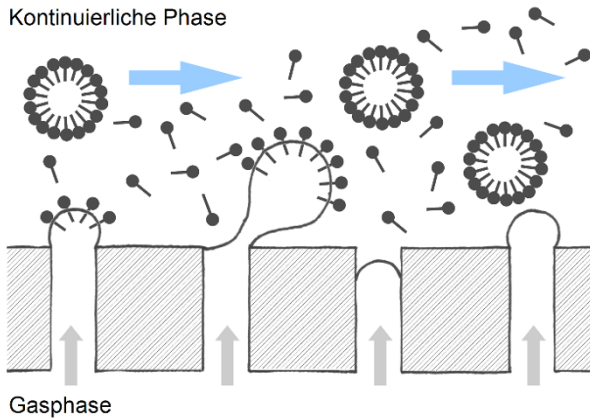


Abb. 11: Modellvorstellung der Blasen- und Schaumbildung mittels Lochplatte, nach [105].

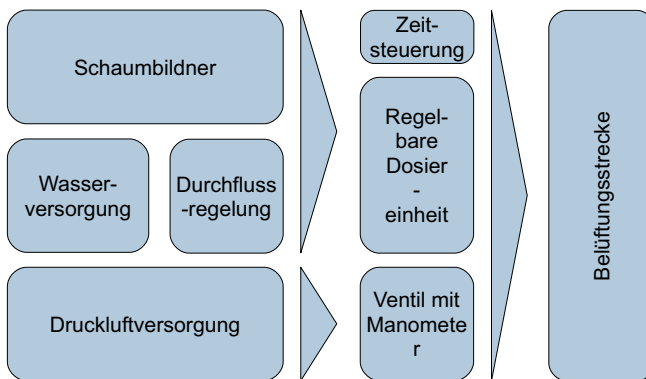


Abb. 12: Schema Schaumgenerator.

Der Zerfallsprozess von Schaum beruht auf einer Vielzahl von gleichzeitig auftretenden und interagierenden Phänomenen, die in unterschiedlichen Modellen abgebildet werden:

³² Bezeichnet einen Zustand, der stabil gegenüber kleinen Änderungen aber instabil gegenüber großen Änderungen ist.

1) Ostwald-Reifung:

Im Zuge der Ostwald-Reifung kommt es aufgrund der Unterschiede des Laplace-Druckes³³ (Formel 2.5 und 2.6 [110]) in verschieden großen, benachbarten Blasen zur Gasdiffusion³⁴ von kleinen hin zu großen Blasen. Dadurch werden die Größenunterschiede verstärkt bis zum Verschwinden der relativ kleineren Blasen (Disproportionierung) (Abb. 13, S. 26) [83, 106, 109, 111].

$$\Delta p = \sigma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \text{ wobei } \Delta = p_i - p_e \quad (2.5)$$

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{\sigma}{r_k}, \text{ für eine Kugel} \quad (2.6)$$

Δp : Kapillarer Krümmungsdruck oder Laplace-Druck als Differenzdruck zwischen der Innen- und Außenseite einer gekrümmten Oberfläche.

$P_{i,e}$: Druck innerhalb bzw. außerhalb eines durch eine gekrümmte Oberfläche eingeschlossenen Körpers.

σ : Oberflächenspannung.

$r_{1/2}$: Hauptkrümmungsradien des Oberflächenelements.

r_k : Kugelradius.

2) Aufrahmen oder Cremen:

Durch das Cremen oder Aufrahmen vollzieht sich eine Trennung von Schaum und Flüssigkeit, sodass sich die Schaumkugeln auf der Oberfläche der sich unten absetzenden Flüssigkeit sammeln. Infolgedessen beginnen sich die Schaumporen, von einer kugeligen Form hin zu Polyedern zu transformieren (Abb. 10, S. 20). Nach STOKES [106] hängt die Aufstiegs geschwindigkeit der Gasblasen (makroskopischen Kugeln) in der Flüssigkeit vom Auftrieb der Blasen selbst ab³⁵ sowie von der Gravitationskonstante und nicht zuletzt von der Viskosität der die Blasen umgebenden Flüssigkeit³⁶ (Formel 2.7).

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{\eta} g \quad (2.7)$$

v : Aufstiegs geschwindigkeit.

g : Erdbeschleunigung.

ρ_p : Dichte des Porenvolumens.

r : Kugelradius.

ρ : Dichte der Flüssigkeit.

η : Viskosität der Flüssigkeit.

Während niedrig viskose Flüssigkeiten eher zu Kurzlebigkeit aufgrund von Koaleszenz (s. u.) neigen, können hochviskose Flüssigkeiten das Schäu-

33 Die Young-Laplace-Gleichung stellt einen Zusammenhang zwischen dem Innendruck einer Blase und deren Größe sowie Grenzflächenspannung her. Der Krümmungsdruck ist umso größer, je kleiner die Krümmungsradien [110].

34 Das Gas muss dazu in der kontinuierlichen Phase löslich sein.

35 Von deren Größe und Dichte.

36 Zur Stabilisierung des Schaumes können Additive zur Steigerung der Viskosität zugegeben werden [112].

mungsverhalten dahingehend negativ beeinflussen, dass ausschließlich Schaum mit, für die häufigsten Anwendungen, zu hoher Dichte hergestellt werden kann [95, 98, 106, 106, 111].

3) Drainage:

Die Bildung einer polyedrischen Struktur wird durch die Schaumdrainage verstärkt. Auf die interlamellare Flüssigkeit wirkende Gravitationskräfte lassen diese abhängig der kapillaren Kräfte zwischen den Lamellen nach unten abfließen. Die Auslaufgeschwindigkeit nimmt dem HAGEN-POISSEUILLE'sche Gesetz³⁷ (Formel 2.8) [113] zufolge mit der Lamellendicke ab (Abb. 13) [106, 109, 111].

$$v(r) = v_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.8)$$

v : Fließgeschwindigkeit.

v_{\max} : Maximale Fließgeschwindigkeit.

R : Radius der Kapillare.

r : Abstand von der zentralen Kapillarachse.

4) Koaleszenz:

Aufgrund der saugenden Kräfte innerhalb der Lamelle infolge von Drainage und Kapillarwirkung buchtet diese ein, damit wächst die Oberfläche des die interlamellare Flüssigkeit einhüllenden Films lokal an und die Konzentration des oberflächenaktiven Stoffes sinkt. Wird eine gewisse Lamellendicke im Verhältnis zur Porengröße unterschritten, reißt diese. Auch dieser als Koaleszenz bezeichnete Vorgang führt zur Bildung von immer größeren Poren oder der Vereinigung mit dem umgebenden Gasraum, das Volumenverhältnis zwischen flüssiger und gasförmiger Phase verschiebt sich zugunsten Erstgenannter (Abb. 13 Und 14) [6, 81].

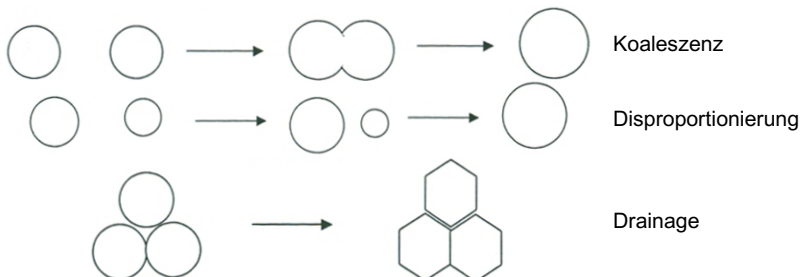


Abb. 13: Schaumzerfallsprozesse, nach [83, 114].

³⁷ In einem durch zwei parallele Wände gebildeten kapillaren Raum proportional zur vierten Potenz der Wandentfernung.

5) Marangonieffekt

Gleichzeitig fließt in einem nach MARANGONI [106] benanntem gegenläufigen Effekt die oberflächenaktive Substanz aufgrund der veränderten Oberflächenspannungsdifferenz in Richtung der Einbuchtung und verzögert damit die Zerstörung der Blase [81].

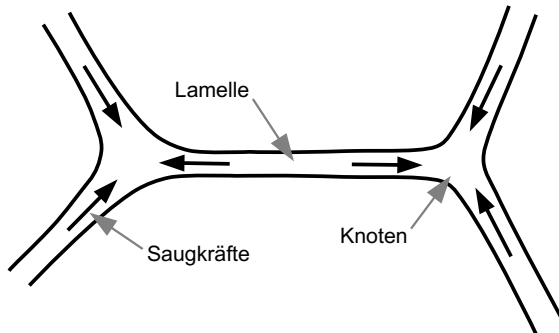


Abb. 14: Saugspannungen innerhalb der Lamellen eines Polyederschaumes, nach [115].

GLAZIER ET. AL. (1987) haben in besonders anschaulicher Weise den dynamischen Zerfallsprozess von Seifenschäumen untersucht und fotografisch festgehalten (Abb. 15). Der Ausgangsschaum lag nahezu vollständig monodispers vor. Schäume mit polydisperser Blasenverteilung wiesen einen schnelleren Zerfallsprozess auf [18].

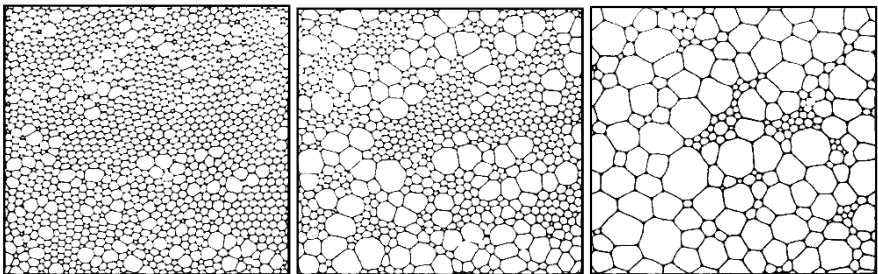


Abb. 15: Fotografisch dokumentierter Zerfallsprozess eines Seifenschaumes (Auszug), Kantenlänge der Quadrate ca. 7 cm, zeitlicher Ablauf in Bezug auf Schaumherstellung von links nach rechts: $t_1 = 2,25$ h, $t_2 = 4,82$ h, $t_3 = 8,63$ h [18].

Neben diesen schauminhärenten, den Zerfall bedingenden Effekten kann es durch Zugabe anderer Stoffe sowie chemischer Verbindungen oder durch Kontakt mit selbigen zur lokalen und durch die Ostwald-Reifung und Koaleszenz zur weiter fortschreitenden globalen Zerstörung des Schaums kommen:

- 1) In Proteinschäume wird der vorherrschende oberflächenaktive Stoff teilweise durch andere Detergenzien (z. B. Polyoxyethylene) von den Positionen an den Grenzflächen verdrängt [83, 116, 117].
- 2) Spreitende Partikel (z. B. Öl) sind ebenfalls grenzflächenaktiv und führen im Kontakt mit dem Lamellenfilm zu einem Abfließen der stabilisierenden Stoffe ähnlich dem Marangonieffekt. Folge ist das Ausdünnen der Lamelle und das Einreißen der selbigen (Abb. 16, rechts) [83, 106, 118].
- 3) Kommen hydrophile Partikel in Kontakt mit der Schaumlamelle führt dies zunächst zu einem zu dem ebenen beschriebenen gegenläufigen Effekt und darüber hinaus zu einem lokalen Absaugen der kontinuierlichen Phase und Ausdünnen der Lamelle bis zu ihrem Versagen (Kap. 5.2.1, S. 122).
- 4) Im Falle dass sich ein festes, inertes und weitgehend hydrophobes Partikel innerhalb des Fluids der Lamelle befindet und diese durch die oben beschriebenen Effekte bis auf die Partikelgröße ausdünn (Drainage etc.), kann es zu einer Überbrückung der Lamelle und zu einem Abfließen der Flüssigkeit kommen (Abb. 16, links) [106].

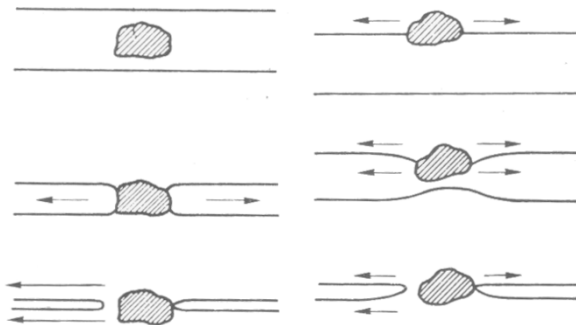


Abb. 16: Spannungsänderungen in einer Schaumlamelle durch Gegenwart eines Partikels. Rechts: Hydrophobes Partikel in der Lamelle, links: Spreitendes Partikel im Kontakt mit dem Lamellenfilm [106].

Zur praktischen Beurteilung der Qualität von wässrigem Schaum, also in erster Linie seiner zeitlichen und strukturellen Stabilität, existieren zahlreiche anwendungsbezogene Normen und Regeln [82, 103, 119], jedoch vornehmlich für die Bereiche der Lebensmittel- [108, 120], Reinigungs- [121], und Feuerlöschtechnik [101, 122, 123]. Wie soeben diskutiert, ist die Qualität und Struktur eines flüssigen Schaumes aber nicht nur von den Umgebungs- und Herstellungsbedingungen abhängig, sondern auch von der Art des verwendeten grenzflächenaktiven Stoffes sowie von den rheologischen Eigenschaften der kontinuierlichen Schaumphase. Dies konnte u. a. in eigenen Versuchen speziell für mineralischen Schaum nachgewiesen werden (Kap. 5.3.2, S. 140) [1, 2, 50]. Für die im vorlie-

genden Zusammenhang untersuchten Problemstellungen hat demzufolge die Beurteilung der Eigenschaften des wässrigen Schaumes nur begrenztes Potential, um auf die spätere Qualität der mineralischen sowie mineralisierten Schäume rückschließen zu können³⁸.

2.2.4 Grenzflächenaktive Stoffe im Bauwesen

In Flüssigkeiten mit großer Oberflächenspannung wie etwa Wasser sind gebildete Blasen nicht von dauerhafter Natur [17]. Die Grenzflächen solcher Fluide können, wie in Kapitel 2.2.2 (S. 22) beschrieben, mit grenzflächenaktiven, insbesondere der Koaleszenz entgegenwirkenden Stoffen stabilisiert werden. Diese Stoffe verfügen über eine hydrophile Kopfgruppe und einen hydrophoben Rest. Sie können nach ihrer Herkunft (synthetisch oder natürlich), ihrer hydrophilen Gruppe (ionisch, nichtionisch oder zwitterionisch) sowie dem Molekulaufbau ihrer hydrophoben Reste³⁹ (Silikon, Keratin etc.) unterschieden werden [104].

Die im Baubereich eingesetzten grenzflächenaktiven Stoffe sind pH-neutral, frei von Stoffen, die negativ auf Metall, Putze oder andere dort verwendete Materialien wirken. Außerdem enthalten sie keine giftigen oder auch brennbaren Stoffen [124]. Die Detergenzien können ganz oder nur teilweise⁴⁰ auf Basis von petrochemischen Produkten oder aus nachwachsenden Rohstoffen als sogenannte „Biotenside“ [125] hergestellt werden. Neben rein synthetischen Tensiden sind im Bau grenzflächenaktive Stoffe auf Basis von Keratinhydrolysaten etabliert [125]. Sie sind aufgrund der erforderlichen, jedoch komplexen mikrobiellen Prozesse zu ihrer Herstellung (s. u.) relativ teuer und nur etwa ein Jahr lagerfähig [83]⁴¹. Das werkstofftechnologische Hauptaugenmerk liegt in der vorliegenden Arbeit auf diesen oberflächenaktiven Stoffen auf Basis von Proteinen aus der Keratinhydrolyse.

Keratine sind hochspezialisierte Mischungen aus Proteinen tierischer Herkunft mit unterschiedlicher dreidimensionaler Struktur und Zusammensetzung. Der Hauptunterschied zu anderen Struktur-Proteinen⁴² liegt im Vorhandensein der

38 Daher wurden anfänglich durchgeführte Vergleichstests zwischen flüssigen Schäumen mit kontinuierlichen Phasen unterschiedlicher Viskositäten nicht systematisch weiter verfolgt (alternativer Versuch beschrieben in Kapitel 4.3.3.3, S. 84 und 5.3.3.1, S. 147).

39 Die hydrophoben Reste sind ein- oder mehrwertige Gegenionen, wobei die mehrw. Ionen meist wasserunlöslich sind [104].

40 Der hydrophobe und der hydrophile Molekülteil eines Tensids können jeweils unterschiedlicher Herkunft sein [125].

41 Jedoch sind sie in jüngster Zeit im Gegensatz zu den 90er Jahren und zum Anfang des neuen Jahrhunderts, wohl aufgrund gestiegener Nachfrage, für Bauanwendung hoch verfügbar [125].

42 Z. B. Kollagen, Elastin [83].

Aminosäure Cystein. Diese Aminosäuren sind durch Peptidbindungen⁴³ miteinander verknüpft. Keratine sind durch ihren hohen Vernetzungsgrad mit Disulfidbrücken unlöslich sowie unreaktiv und bilden den Hauptbaustein haltbarer wie auch biegsamer epidermaler Anhangsgebilde⁴⁴ [127]. Diese Disulfidbrücken können durch Reduktion gespalten und infolgedessen die Keratin-Proteine enzymatisch hydrolysiert⁴⁵ werden. Das Hydrolysat wird unter Verwendung von Ammoniak neutralisiert. Die wirksamen proteinogenen Aminosäuren werden unter Nutzung unterschiedlichen Löslichkeiten getrennt oder mit der Ionenaustausch-Chromatographie isoliert [83, 126, 129, 130].

Die auf diese Weise hergestellten sogenannten Proteinschaumbildner setzen, wie niedrigmolekulare oberflächenaktive synthetische Tenside, die Oberflächenspannung von Wasser herab [83, 131]. Im Zuge der Adsorption an der Grenzfläche kommt es zu einer Konformationsänderung⁴⁶ des Proteins⁴⁷, das diese so selbstorganisierend bedeckt und deren Eigenschaften ändert. Das Ausmaß der Konformation ist von der verfügbaren Oberfläche im Verhältnis zur Konzentration des Proteins abhängig [83, 132].

Die mit diesem Schaumbildnertypus hergestellten wässrigen Schäume sind fest mit elastischen Eigenschaften [27]. Tenside rein synthetischer Herkunft lassen sich zwar meist bei etwas höherer Konzentration leichter aufschäumen [6, 7], jedoch haben viele Biotenside insgesamt bessere grenzflächenstabilisierende Eigenschaften (mehr zum Stabilitätsbegriff in diesem Zusammenhang siehe Kapitel 2.2.3, S. 23). Dies ist u. a. durch den Umstand begründet, dass die Proteine über die Zeit in kleinere hydrophobe Moleküle zerfallen, die wiederum untereinander Wasserstoffbrückenbindungen etablieren [13, 125].

43 Carbonsäureamid-Gruppierung - CO - NH -, die bei der Kondensation von Aminocarbonsäuren entsteht, wenn die Carboxy-Gruppe - COOH einer Aminosäure mit der Aminogruppe - NH₂ einer anderen Aminosäure unter Abspaltung von HO₂ reagiert [126].

44 Z. B. Haare, Nägel, Klauen, Schuppen und Federn [83].

45 Proteine können unter Katalyse, also bei veränderter chemischer Kinematik durch die Gegenwart eines Katalysators, durch ein Enzym gespalten werden. Dies nennt man dann Hydrolase [126, 128]. Das heißt, sie können mithilfe von Enzymen in wasserlöslich gemacht werden.

46 Funktionsbedingende oder -ändernde räumlich strukturelle Änderung eines Proteins [129].

47 Proteine (Eiweiße) sind „natürlich vorkommende Copolymere, die sich in der Regel aus 20 verschiedenen Aminosäuren als Monomeren zusammensetzen. Von den nahe verwandten Polypeptiden werden sie aufgrund ihrer molarer Größe unterschieden, wenn auch nicht immer streng abgegrenzt [126].“

2.3 Bindemittelmatrix

Mineralisierter Schaum ist ein Material bestehend aus einer kontinuierlichen, festen Phase und einer diskontinuierlichen, gasförmigen Phase. Die in einem Schaumsystem vorherrschenden Eigenschaften sind jedoch, neben dem bloßen Anteil der diskontinuierlichen Phase, vor allem durch die Charakteristiken der festen kontinuierlichen Matrix bestimmt [17]. Somit ist im vorliegenden Fall die gewählte Zusammensetzung des Zementsteins maßgeblich (Kap. 4.2, S. 59), dessen generellen Merkmale daher Gegenstand des folgenden Kapitels sind.

2.3.1 Hydratation von Zement und Festigkeitsentwicklung

a) Hauptklinkerphasen von Portlandzementen

Zement reagiert unter Zugabe von Wasser zu einer gesteinsähnlichen festen Matrix. Die Hauptklinkerphasen von Portlandzementklinker sind Tricalciumsilicat ($C_3S/Alit$), Dicalciumsilicat ($C_2S/Belit$), Tricalciumaluminat ($C_3A/Aluminat$) und Dicalciumaluminatferrite ($C_4(A,F)$). Sie entstehen beim Brennen der Ausgangsstoffe. Darüber hinaus wird zur Regelung des Hydratationsverlaufs dem Zement Calciumsulfat (Cs) und Calciumhydroxid (CH) zugemalen.

Die verschiedenen Klinkerphasen haben unterschiedlichen Anteil an der Zementzusammensetzung⁴⁸, am Reaktionsverlauf sowie an den zeitlich variablen mechanischen Eigenschaften des Endproduktes [133, 134]. Tricalciumsilicat zeichnet sich durch eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit aus, die eine schnelle Erhärtung und hohe Endfestigkeit bedingt; dies geht mit einer starken Hydratationswärmeentwicklung einher [135]. Dicalciumsilicat verursacht eine langsamere und stetigere Festigkeitsentwicklung und erzeugt geringere Hydratationswärme [136]. Dicalciumaluminatferrite reagieren ebenfalls langsamer und haben einen geringen Anteil an der Endfestigkeit, entsprechend ist ihr Beitrag an der freigesetzten Wärme [137, 138].

48 Durchschnittliche Anteile der Klinkerphasen in einem Portlandzement: C_3S 65 %, C_2S 13 %, C_3A 11 % und C_4AF 8 %.

b) Hydratationsverlauf

Der Hydratationsverlauf von Zement ist vielschichtig⁴⁹ und noch nicht vollständig verstanden. Bautechnisch wird er in drei die Festigkeit bildende Schritte unterteilt. Nach dem Anmachen folgt bei Erreichen einer nach DIN EN 196-3 definierten Konsistenz, das Erstarren bzw. das Ansteifen und zum Schluss die Erhärtung [140, 141]. Aus chemischer Sicht wird der Prozess hingegen meist vereinfacht in fünf Perioden unterteilt. Die Notation erfolgt hier gestützt auf Stark & Wicht (2000) und YE (2003) bzw. auf MINDESS & YOUNG (1981) sowie ODLER (1998) [139, 142–144].

Unmittelbar nach Wasserzugabe zum Zement beginnt der Prozess des Ansteifens⁵⁰, wobei die Zementpartikel bis in die darauf folgende Ruheperiode⁵¹ weiterhin gegeneinander beweglich bleiben. In dieser ersten Hydratationsperiode bilden sich strukturstabilisierende nadelige Ettringitkristalle aus der Reaktion von Calciumsulfationen mit Tricalciumaluminat (Formel 2.9.1) [145] und ausgehend vom Tricalciumsilicat u. a.⁵² erste Calciumsilicathydrate variabler Zusammensetzung sogenannter CSH-Phasen (z. B. $C_3S_2H_3$) (Formel 2.11) [135]. Nach geltender Meinung bilden beide Reaktionsprodukte eine dünne Gelhaut um die Zementkörner und erschweren damit einen Kontakt mit Wasser [146]. Der daraus resultierende behinderte Transport von H_2O und SO_4^{2-} kennzeichnet die Ruheperiode (Formel 2.9.2), deren Dauer unter anderem von der Mahlfineinheit des Zementes abhängt [139, 140].

Reaktion des Tricalciumaluminats bei Anwesenheit von Sulfat:



und in der Sekundärreaktion mit Ettringit:



Nach Abbau des Calciumsulfats und Erreichen einer Ionensättigungskonzentration können die CSH-Phasen kristallisieren, sodass mit der sogenannten Beschleunigungsperiode⁵³ das Erstarren des Zementleims beginnt. Sie ist durch eine intensive Reaktion der Klinkerphasen gekennzeichnet (Formeln 2.11 und dann 2.12). Die dann entstehenden größeren Kristalle, bestehend aus länglichen Ett-

49 So wurden die meisten Untersuchungen zum Erhärtungsverhalten von Portlandzement an den reinen Klinkerphasen durchgeführt. Dabei wurde von deren voneinander unabhängigen chemischen Reaktionen ausgegangen, was jedoch nur teilweise der Fall ist [139].

50 Phase I, auch Induktionsperiode Dauer: 15 min – 1 h.

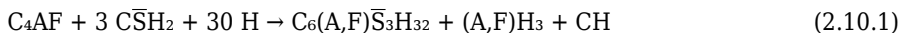
51 Phase II, auch dormante Periode (engl. dormant stage), Beginn: 15 min – 1 h nach Wasserzugabe, Dauer: 1 h bis 2 h.

52 Es bilden sich u. a. folgende Ionen: Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} , K^+ und Na^+ .

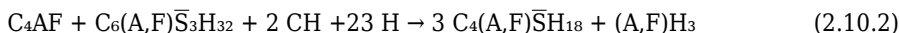
53 Phase III, auch Accelerationsperiode, Beginn: ca. 3 h nach Wasserzugabe, Dauer 1 h bis 10 h.

ringitkristallen und plattigen CSH-Phasen, überbrücken die Räume zwischen den Zementpartikeln [133, 144].

In der darauf folgenden Retardationsperiode⁵⁴ des Erhärtens, gekennzeichnet durch Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit, wird das Gefüge durch weitere Bildung von CSH-Phasen verfestigt und die Poren u. a. durch Aluminat- und Aluminatsulfathydrate (Formel 2.10) sowie Calciumhydroxid immer mehr gefüllt⁵⁵. Die Hydratation von C₄AF wird ebenfalls durch einen Sulfatträger verzögert. Im Rahmen dieser Phase wird die Frühfestigkeit des Zementsteins gebildet [139, 144].



und in der Sekundärreaktion mit Ettringit:



Während anfänglich das C₃A die bestimmende Phase ist, gewinnt bei fortschreitender Hydratation das C₃S und später das C₂S (Formel 2.12) für die Festigkeitsausbildung stetig an Bedeutung [133, 144].

Reaktion der Calciumsilicate zu Calciumsilicathydraten:



Die letzte Phase der Hydratation bildet die diffusionskontrollierte Finalperiode⁵⁶, in der sich die sogenannte „Endfestigkeit“ bzw. 28-Tage-Festigkeit nach DIN EN 196 einstellt [133, 134, 144, 147].

c) Verzögernde Faktoren

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter anderem der Einfluss der Abbindegeschwindigkeit des Bindemittelleims als kontinuierliche Phase auf die Verteilung der dispersen Phase im Schaum untersucht. Teil dieser Überlegung sind eventuelle hydrationsverzögernde Effekte resultierend aus den gewählten Randbedingungen (Kap. 4.2, S. 59 und Kapitel 5.3.3, S. 147).

Während der Zementhydratation wird abhängig der Klinkerzusammensetzung, des Klinkeranteils und der Mahlfeinheit des Zements unterschiedlich schnell und in verschiedener Höhe Wärme freigesetzt (s. o. und Kapitel 4.3.2.3, S. 80) [133]. Wie jede exotherme Reaktion ist die Kinetik der Zementhydratation zudem von der Umgebungstemperatur abhängig. In gewissen Grenzen läuft die

⁵⁴ Phase IV, Dauer 5 h bis 24 h.

⁵⁵ Die Reaktion vollzieht sich im Randbereich der Zementpartikel, sodass sich dort nach 12 h 0,5 µm bis 1,0 µm starke Schichten aus den Hydratationsprodukten bilden [146].

⁵⁶ Phase V, Dauer: Monate bis Jahre.

Reaktion bei höheren Temperaturen schneller und bei niedrigeren Temperaturen langsamer ab⁵⁷ [144].

Wird das Abbinden durch inhibierende Zusätze gestört, kann dies signifikante Auswirkung auf den Verlauf der Hydrationswärmeentwicklung⁵⁸ haben und Verzögerungen von Erstarrungsbeginn und -ende bedingen [138]. Als Betonzusatzmittel zur Verzögerung sind anorganische Stoffverbindungen wie Tetrakaliumpyrophosphat und Trinatriumpolyphosphat üblich [149]. Sie bilden auf der Zementkornoberfläche in der Frühphase der Hydratation schwer lösliches Calciumphosphat. Dies behindert, zusätzlich zur Gelhaut die Reaktion der Calciumaluminate und -silikate [150]. Daneben wird die Konzentration von Ca^{2+} und OH^- -Ionen gesenkt, was zu einer verzögerten Bildung von CSH-Phasen führt [151]. Andere Stoffverbindungen üben durch Adsorption auf bestimmte Kristallflächen Einfluss auf die Menge und Ausmaß Ettringitbildung sowie auf die Kristallisation selbst aus [152, 153]. Auch eine Vielzahl von organischen Verbindungen⁵⁹ hat verzögernde Wirkung. [150], so werden auch Proteine wie Casein gezielt für diese Zwecke eingesetzt [151].

2.3.2 Wasseranteil, Gefüge und Poren

Das Zementsteingefüge bzw. dessen Porosität ist maßgeblich vom Wasserzementwert beeinflusst (Tab. 2). Nach gängiger Theorie wird bei Wasserzementwerten signifikant über 0,4 der Zement mit einem Teil des Wassers vollständig zu Zementgel umgesetzt. Dies ist dann von wassergefüllten Kapillarporen durchzogen. Bei Wasserzementwerten um 0,4 weist das Zementgel hingegen ausschließlich Gelporen auf. Niedrigere Wasserzementwerte lassen im Inneren nicht hydratisierte Zementkörner zurück, die nur an der Oberfläche mit Wasser zu Zementgel umgesetzt wurden. Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Oberfläche hat die Mahlfeinheit auf das beschriebene Verhalten signifikanten Einfluss. Nach Ablauf der Hydratation macht das gebundene Wasser ca. 38 % der Zementmasse aus; ungefähr ein Viertel ist chemisch gebunden, die Gelporen enthalten ca. 15 % des Wassers [133, 144].

Wie soeben diskutiert ist die Gelporosität im hydratisierten Zement unabhängig vom Wasserzementwert. Es handelt sich dabei um ca. 0,5 nm bis 30 nm große, mit physikalisch gebundenem Wasser⁶⁰ gefüllte Räume, die entstehen, da das Vo-

57 Dieser Umstand wird u. a. in der Zementchemie häufig mit der Arrhenius-Gleichung (1889) beschrieben. Derzufolge sich die Reaktionsgeschwindigkeit pro +10 K ungefähr verdoppelt [148].

58 Auch die chemische Zusammensetzung des Wassers und die darin enthaltenen Fremdstoffe können den Hydrationsablauf beeinflussen [140].

59 Z. B. Hydroxycarbonsäuren, Saccharosen, Gluconate, Lignosulfonate, Organophosphate, Methylcellulose, Dextrin und Casein.

60 „Ein Wassermolekül ist näherungsweise eine Kugel mit einem Durchmesser von 0,3 nm [144].“

lumen des Hydratationsproduktes kleiner ist als die Summe der Volumina der Ausgangsstoffe. Die unmittelbar aus diesen das Volumen mindernden Umsetzung entstehenden, unvermeidbaren Spannungen führen zu ca. 10 nm großen sogenannten Schrumpfporen, die ob ihrer Größe oftmals den Gelporen zugerechnet werden (Schwinden und Schrumpfen siehe weiterhin Kapitel 2.3.3, 35).

Tab. 2: Poren im Zementsteingefüge [133, 154].

Porenart	Porendurchmesser
Gelporen	0,5 nm bis 30 nm
Mikro-Kapillarporen	30 nm bis 1 µm
Meso-Kapillarporen	1 µm bis 30 µm
Luftporen/Makro-Kapillarporen	30 µm bis 1 mm

Das während der Hydratation teilweise austretende, überschüssige Wasser hinterlässt ein Kapillarporennetz, dessen Volumen bei Wasserzementwerten größer 0,4 annähernd direkt proportional zum steigenden Wasseranteil ist. Es ist durch seine in direkten Umgebungskontakt stehenden, zwischen 10 nm bis 100 µm im Durchmesser großen Poren maßgeblich für die Transportphänomene im Zementstein verantwortlich [144, 155].

2.3.3 Formänderung

Im Allgemeinen werden Formänderungen des Zementsteins auf folgende Ursachen zurückgeführt: Elastische und bleibende Verformungen aufgrund äußerer mechanischer Spannungen (Kriechen), Schwinden und Quellen hervorgerufen durch Änderungen des Wasseranteils im Zementstein, Verformungen infolge von Temperaturänderungen sowie Dehnungen durch chemische Reaktionen. In Bezug auf die werkstoffspezifischen Formänderungen von Zement wird, da der hier behandelte mineralisierte Schaum nur schwerlich zu konstruktiven Zwecken eingesetzt werden kann, vornehmlich auf die spannungsunabhängigen Phänomene eingegangen [135].

a) Thermische Verformung

Der Wassergehalt von Zementsteins ist in erster Linie von der Umgebungsfeuchte und der Porosität desselben abhängig. Das in ihm physikalisch gebundene und über den Feuchteausgleich enthaltene Wasser beeinflusst maßgeblich seine

thermische Verformung. Bei vollständiger Trocknung⁶¹ und bei Wassersättigung variiert der thermische Ausdehnungskoeffizient α für Zementstein zwischen etwa $10 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ und $12 \cdot 10^{-6} / \text{K}$. Sein Maximum erreicht α bei einer Gleichgewichtsfeuchte von 70 % mit $24 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ [157, 158]. Der Zusammenhang zwischen der Größe des Koeffizienten und dem Wassergehalt ist jedoch nicht direkt proportional. Ursachen dafür sind zum einen in der zeitlich verzögerten Bewegung des Wassers im nur begrenzt durchlässigen Porengefüge des Zementsteins zu suchen [135, 159]. Zum anderen dehnt sich Wasser im Temperaturbereich von 5 °C bis 20 °C etwa drei- bis viermal so stark aus wie der Zementstein selbst. Folge beider Phänomene kombiniert sind Sorptionseffekte durch entstehende Unterdrücke beim Abkühlen bzw. Überdrücke beim Erwärmen [135, 160]. Im Allgemeinen werden bei Temperaturänderungen die Wärmedehnungen durch Feuchtedehnungen überlagert [144].

b) Schwinden

Formänderungen zementgebundener Baustoffe sind vor allem auf die Eigenschaften des Zementsteins selbst zurückzuführen. Schwinden beschreibt das langfristige Phänomen isotroper Volumenverkleinerung von Zementstein. Es ist auf eine Kombination verschiedener Ursachen zurückzuführen, die alle auf Veränderungen des Feuchtezustandes im Gefüge beruhen. Der bautechnisch weniger bedeutende gegenläufige Effekt wird als Quellen bezeichnet [144].

Chemisches Schwinden

Das gemeinsame Volumen des umgesetzten Zements und des bei vollständiger Hydratation chemisch gebundenen Wasseranteils ist um ca. $6 \text{ cm}^3 / 100 \text{ g}$ Zement kleiner als die Summe der Volumina der Ausgangsprodukte. Der Grund dafür liegt im ca. 25 %igen volumeneffizienteren Einbau der Wassermoleküle bei der chemischen Bindung in das kristalline Gitter der Hydratationsprodukte [144]. Eine Folge ist das sog. chemische Schwinden ε_c , das sich jedoch bei weitem nicht vollständig in einem externen Schwindmaß äußert. Vielmehr bildet sich während der Erhärtung ein stützendes Skelett aus hydratisiertem Zementstein, das einer messbaren Schwindverformung immer stärkeren Widerstand entgegensetzt (vgl. Abb. 17) [161].

61 Wobei die Abgrenzung von „verdampfbarem“ und „nicht verdampfbarem“ Wasser nicht trivial ist und je nach Modell variieren kann [133]. In diesem Zusammenhang wird Trocknen im Sinne der DIN EN ISO 12570 gebraucht [156]. Somit kann eventuell nach dem Trocknungsvorgang auch ein kleiner Teil des Gelporenwassers ausgetrieben sein [133].

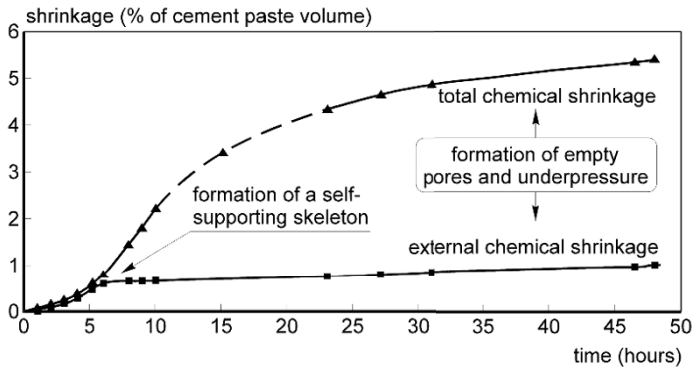


Abb. 17: Zeitlicher Verlauf des gesamten und äußerlich messbaren Schwindmaßes von Zementleim (w/z = 0,4) [161, 162].

Karbonatisierungsschwinden

Das Karbonatisieren (Formel 2.13) ruft Änderungen im Aufbau der Calciumsilicat- und Calciumaluminathydrate hervor, die ebenfalls für eine Art chemischen Schwindens verantwortlich sind. Die Geschwindigkeit des sogenannten Karbonatisierungsschwindens ε_k verhält sich analog zum Karbonatisierungsfortschritt und ist damit abhängig von der Porigkeit des Zementsteins, welche wiederum bestimmend für den CO_2 -Zutritt und die Feuchtigkeitsbedingungen ist. Das mit Kohlendioxid reagierende Calciumhydroxid muss zunächst in Lösung gehen, daher läuft die Karbonatisierung in einer wechselnden trockenen und feuchten Umgebung bei Wasserzementwerten von über 0,5 beschleunigt ab. Der Maximalwert der Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird bei ca. 50 % rel. F. erreicht. Das Karbonatisierungsschwinden von Zementstein kann das Trocknungsschwinden übersteigen [135, 144, 163, 164].



Es tritt bei Zementleim das Phänomen des frühen Schrumpfens oder Blutens aufgrund einer unzureichenden Wasserbindung zu grober Zementkörnung oder eines Wasserüberangebotes auf [144].

Trocknungsschwinden

Trocknungsschwinden oder kapillares Schwinden ε_{tr} ist, solange dadurch keine Gefügeänderungen induziert werden, durch anschließendes Quellen reversibel. Es handelt sich um einen rein physikalischen Schwindvorgang. Ab Wasserzementwerten größer als 0,4 durchzieht den Zementstein ein Netz von Kapillarporen (Kap. 2.3.2, oben), die Wasser bei Luftfeuchten zwischen 40 % und 100 % aufnehmen und abgeben. Die Hauptursache für das Trocknungsschwinden sieht man heute in der Änderung der freien Oberflächenenergie, das heißt der freien

Bindungskräfte an den inneren Oberflächen des Zementsteins, die im Kräftegleichgewicht mit den Spannungen in den Gelteilchen stehen. Diese werden durch Adsorption von Wassermolekülen vermindert, deren Desorption bewirkt das Gegenteil. Die Folge ist Expansion bzw. Kontraktion des Zementsteins. Bei Luftfeuchte von 40 % und 100 % sind Kapillarporen spannungsfrei. Bei zu hohen Spannungen, in Relation zur Eigenfestigkeit des beanspruchten Materials, brechen die Porenwände und das Schwinden ist teilweise irreversibel [135, 144].

Autogenes Schwinden

Volumenminderungen von Zementstein ohne Feuchteabgabe bei Wasserzementwerten unter 0,5 werden als autogenes Schwinden⁶² oder Schrumpfen⁶² ε_a bezeichnet. Der oben genannte volumeneffiziente Einbau der Wassermoleküle in die Hydratationsprodukte kann in diesem Fall vor allem im frühen Stadium der Erhärtung zu Rissbildung führen. Bei geringem Angebot freien Wassers wird das physikalisch absorbierte Wasser in Poren und Kapillaren verbraucht. Dadurch sinkt die innere relative Feuchte, was zu kapillaren Zugkräften und äußerer Volumenkontraktion führt (Abb. 18) [133]. Somit ist autogenes Schwinden zwar chemisch induziert, aber es handelt sich aufgrund seiner Wirkungsweise um eine Art des physikalischen Schwindens.

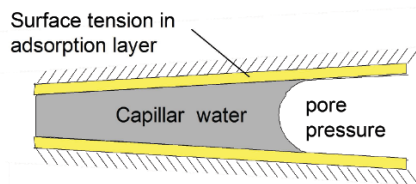


Abb. 18: Schematische Darstellung der Mechanismen im Zementstein infolge autogenen Schwindens [161].

c) Schwindmaß und Einflussfaktoren

Das Schwindmaß von Zementstein strebt asymptotisch, über mehrere Jahre hinweg, einem Endwert zu. Für reinen Zementstein liegt dieser durchschnittlich bei etwa 7 mm/m⁶³ [144]. Maximale Schwindmaße von reinem Zementstein können bei erstmaligem Trocknen bei einer relativen Feuchte von 11 % bis zu 10 mm/m

62 Powers bezeichnete seine Beobachtungen des Austrocknens einer abgedichteten Zementsteinprobe als Selbst austrocknung (engl. „self-desiccation“) [165].

63 Für Zementmörtel liegt der Wert zwischen 1 mm/m und 2,5 mm/m und für Normalbeton bei 0,5 mm/m. Bei langsamem Austrocknen beträgt das Schwindmaß von Mörtel 1 mm/m bis 2 mm/m und von Normalbeton 0,2 mm/m bis 0,5 mm/m [166]. Das Schwinden von Leichtbeton ist meist ausgeprägter [144, 167].

betragen⁶⁴. Durch anschließende Wiederbefeuchtung und Trocknung konnten die reversiblen Anteile des Schwindens zu 3 mm/m bis 4 mm/m ermittelt werden. Sie entsprechen den irreversiblen und reversiblen Anteilen der Wasseraufnahme und -abgabe [135, 168]. Real bewegen sich die Werte für das Schwinden im oben genannten Bereich, ohne die Maxima zu erreichen und rufen somit nur mittlere Dehnungen und Spannungen hervor [144].

Unabhängig von der Kapillarität eines Zementsteins ist das Schwinden eine Eigenschaft des Zementgels⁶⁵. Somit ist das Schwindmaß eines Materials mit hohem Anteil an hydratisiertem Zement und somit größerem Gelanteil ausgeprägter. Bei höherer Mahlfeinheit und ausreichendem Wasserangebot hydratisiert ein größerer Anteil des vorliegenden Zements. Die Zementzusammensetzung, mit Ausnahme hoher CSA-Gehalte, hat dagegen geringere Auswirkungen auf das Schwinden [135, 144].

Bautechnisch entscheidend ist in erster Linie das Endschwindmaß bzw. der irreversible Anteil des Schwindmaßes. Beide sind stark vom Grad der Porosität abhängig, unabhängig davon ob autogenes oder kapillares Schwinden [135, 169]. Dabei ist Geschwindigkeit und absolute Größe des Schwindens höher, je trockener die Umgebungsluft ist [144]. Die Auswirkungen des autogenen Schwindens lassen sich dauerhaft durch ein zeitweise höheres äußeres Wasserangebot beeinflussen⁶⁶. So wird zwar durch fortschreitende Hydratation Wasser im Inneren des Zementsteins umgesetzt, ohne aber zu Spannungen durch inneres Austrocknen zu führen [133].

Das Endmaß des Schwindens und damit auch der maximal erreichbare irreversible Anteil sind, nach herrschender Meinung, von einer dauerhaft stärkeren Ausbildung der chemischen und physikalischen Bindungen im Zementsteingefüge abhängig [135]. Schwindet der Zementstein aufgrund der Randbedingungen nur langsam, wird somit auch sehr wahrscheinlich sein Endschwindmaß relativ gering ausfallen. Somit haben auch die Geometrie des untersuchten Körpers und die davon teils abhängigen Trocknungsbedingungen Einfluss auf das mittlere Schwindmaß [144].

Auch findet im Zementstein, der unter etwa 30 % rel. F. gelagert wird, keine Karbonatisierung statt (Formel 2.13). Unter diesen Umgebungsbedingungen geht das in ihm befindliche Calciumhydrat nicht in Lösung. Dementsprechend erfährt der Zementstein kein Karbonatisierungsschwinden [135].

64 Die Tendenz zum reinen Quellen von Zementstein, der nach dem Ausschalen unter Wasser gelagert wurde, liegt bei ca. 1 mm/m [166].

65 „Für das Schwinden von Mörtel und Beton ist in erster Linie der Zementstein maßgebend. Die Zuschlagkörner behindern das Schwinden des Zementsteins [135].“

66 „Weiteren Einfluss auf den Grad der „Selbstaustrocknung“ haben der Zementtyp, die Nachbehandlung (Temperatur und relative Feuchte) sowie der Gehalt an Microsilica [144].“

2.4 Rheologie und Rheometrie von Zementleimen

2.4.1 Grundbegriffe der Rheologie

Die Rheologie⁶⁷ beschreibt als die Lehre vom Fließen die Verformung von Körpern (Festkörpern, Flüssigkeiten oder auch Gasen) als Reaktion auf eine von außen einwirkende Kraft [100]. Festkörper werden dabei von Flüssigkeiten oder Gasen durch die Art der möglichen Beanspruchung unterschieden. Erstere lassen sich, im Gegensatz zu den anderen beiden Materialtypen, dehnen und können neben Schubspannungen⁶⁸ τ somit auch Normalspannungen σ aufnehmen [170].

Ideales Fließverhalten

Ein idealer Festkörper, auch Hookescher Körper genannt, verhält sich ideal-elastisch (Formel 2.14). Das heißt, die Energie der Deformation wird nach Entlastung des Körpers wieder vollständig zurückgewonnen. Ideale Fluide hingegen, die ein sogenanntes idealviskoses oder Newtonsches Fließverhalten aufweisen (Abb. 20), fließen sofort bei Beanspruchung und erfahren eine irreversible Verformung. Die Deformationsenergie in der Flüssigkeit (oder auch im Gas) wird vollständig in Wärme umgewandelt [87].

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.14)$$

τ : Schubspannung.
 G : Schubmodul.
 γ : Scherung.

Scherrate

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ (auch Schergeschwindigkeit oder Schergefälle, engl. shear rate) [172], ist die "Scherkomponente des Tensors der Verformungsgeschwindigkeit" [170]. Sie beschreibt das Gefälle der Verformung innerhalb eines Stoffes in Abhängigkeit vom Abstand zur aufgebrachten äußeren Last (Gleichung 2.15, Abb. 19).

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh} \quad (2.15)$$

$\dot{\gamma}$: Scherrate.
 v : Geschwindigkeit.
 h : Abstand zur aufgebrachten Last.

67 Griechisch: rhéos = das Fließen, logos = die Wissenschaft

68 Die Schubspannung (auch Scherspannung, engl. shear stress) ist eine auf die Fläche bezogene Kraft, mit einer parallel zur Angriffsfläche liegenden Richtung [170]. Sie kann als Scherwiderstand gesehen werden, welchen eine Substanz aufgrund inneren Widerstandes, einer Bewegung entgegensetzt [171].

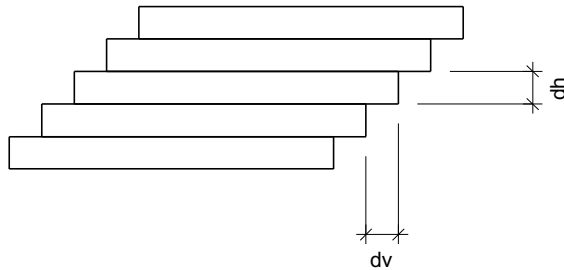


Abb. 19: Vorstellung einer ebenen schichtförmigen, laminaren Strömung, nach [100].

Viskosität

Die Viskosität η eines Materials resultiert aus den inneren Reibungskräften zwischen den Molekülen, welche beim Fließvorgang gegeneinander verschoben werden. Sie ist Maß für den inneren Widerstand eines Stoffes gegen Fließen. Diese kann nicht direkt gemessen werden und wird mit dem newtonschen Gesetz (Gleichungen 2.16 und 2.17) beschrieben [100, 170, 173].

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.17)$$

η : Viskosität.
 τ : Scherspannung.
 $\dot{\gamma}$: Scherrate.

Im Falle einer völligen Unabhängigkeit der Viskosität eines Stoffes von der Scherrate ist der Fließwiderstand direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit; die Schubspannung steigt linear mit der Scherrate (Abb. 20). Die Viskosität eines newtonschen Fluids ist nur vom Druck und der Temperatur abhängig. Substanzen, die annähernd das beschriebene Verhalten aufweisen, sind durch sehr geringe intermolekulare Wechselwirkungen gekennzeichnet [100, 174].

Nicht-Newtonsches Fließverhalten

Tatsächlich besitzen nahezu alle Substanzen einen viskosen sowie einen elastischen Anteil und werden daher als viskoelastisch bezeichnet. Dieses Nicht-Newtonsche Fließverhalten ist durch eine nicht lineare Abhängigkeit zwischen Scherrate und Schubspannung charakterisiert [174]. Bei Nicht-Newtonschen Stoffen spricht man von scheinbarer Viskosität (Formel 2.18), um auszudrücken, dass bei unterschiedlichen Scherraten aufgrund zahlreicher möglicher Abhängigkeiten unterschiedliche Viskositätswerte auftreten können [100, 172, 175, 176].

$$\eta = f(N, T, p, t, E, \dot{\gamma}) \quad (2.18)$$

η :	Viskosität.
N :	physikalische, chemische Beschaffenheit der Probe.
T :	Temperatur der Substanz.
p :	Druck.
t :	Zeit (z.B. vorausgegangene Belastungsdauer oder Ruhezeit).
E :	elektrisches Feld.
$\dot{\gamma}$:	Scherrate.

Fließgrenze

Materialien, die unterhalb eines bestimmten Schubspannungswertes infolge einer äußeren Kraft keine Verformung oder nur elastisches Verhalten zeigen, sich aber oberhalb dieser Grenze irreversibel also plastisch verformen, werden als viskoplastische Stoffe bezeichnet. Der Schubspannungswert, der den Übergang von elastischem bzw. reversiblen zu irreversiblen Deformationsverhalten markiert ist als Fließgrenze τ_y (engl. yield-point) definiert [177]. Bei einer kleinen äußeren Kraft, bei der die Fließgrenze nicht erreicht wird, kann sich auch ein eigentlich flüssiges Material aufgrund seiner internen Strukturkräfte wie ein Festkörper verhalten⁶⁹; kleine Deformationen können sich nach einer Entlastung vollständig zurückbilden [100]. Die Fließgrenze ist "die kleinste Schubspannung, oberhalb derer ein plastischer Stoff sich rheologisch wie eine Flüssigkeit verhält" [170]. Die Fließkurve (Abb. 20) beginnt in diesem Fall nicht im Koordinatenursprung, sondern ist auf der Ordinate in den Punkt τ_y verschoben. Neben den in Formel 2.18 aufgezeigten Abhängigkeiten, ist insbesondere die Fließgrenze von der Beanspruchungsgeschichte der Messflüssigkeit abhängig [178, 179].

2.4.2 Belastungsabhängiges Fließverhalten

Die Beschreibung von rheologischen Verhaltensweisen kann belastungsabhängig und zeitabhängig erfolgen. So ist idealviskose Verformung linear von der äußeren Belastung abhängig. Nimmt jedoch die Viskosität eines Stoffes mit steigen der Scherbeanspruchung bzw. Scherrate zu, kommt es also zu einer Fließverfestigung, wird dies als scherverdickendes oder dilatantes Fließverhalten bezeichnet (Abb. 20, Formel 2.19) [100].

$$\eta_{st} = \frac{\eta}{\dot{\gamma}} \quad (2.19)$$

η_{st} :	Strukturviskosität.
η :	Scheinbare Viskosität.
$\dot{\gamma}$:	Scherrate.

69 Materialien mit plastischem Fließverhalten, also mit einer Fließgrenze, bauen im Ruhezustand ein intermolekulares Netz von Bindungskräften (z.B. polare Bindungen, molekulare Wechselwirkungskräfte) auf, welches eine Verschiebung von Volumenelementen verhindert [176].

Im Falle von scherverdünnendem oder strukturviskosem Fließverhalten nimmt die Viskosität bei steigender Scherbelastung ab (Abb. 20). Scherverdünnendes Verhalten ist meist auf eine sogenannte Strukturviskosität (auch: scheinbare Viskosität) zurückzuführen [100, 172].

2.4.3 Zeitabhängiges Fließverhalten

In der DIN 1342-1 wird eine Abnahme der Viskosität über die Zeit bei konstanter Scherbeanspruchung von einem ursprünglichen Wert im Ruhezustand als thixotropes Fließverhalten definiert, wenn nach dem Ende der Belastung die Viskosität wieder auf den ursprünglichen Wert ansteigt. Dieses Verhalten ist auf einen inneren Strukturabbau unter Belastung zurückzuführen. Thixotrope Stoffe haben daher eine deutliche Fließgrenze, jedoch sind nicht alle Substanzen mit einer Fließgrenze thixotrop. Diese Materialien zeigen somit auch immer strukturviskoses oder scherentzähendes Verhalten [170, 173, 181].

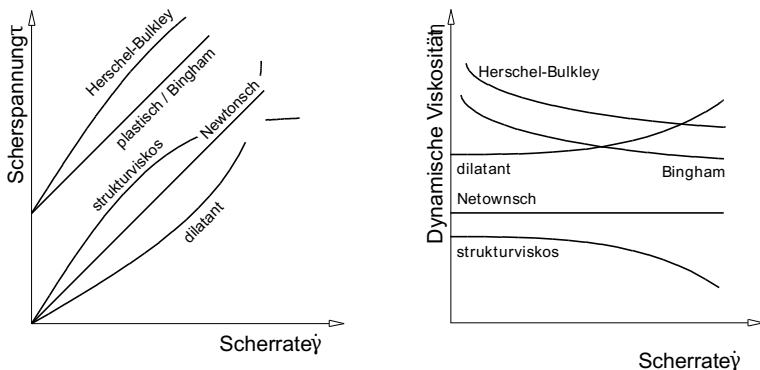


Abb. 20: Übersicht wichtiger modellhafter Fließ- (links) und Viskositätskurven (rechts), eigene Darstellung nach [100, 180].

Wird die Fließgrenze nach dem Strukturaufbau auf Grundlage der nach einer bereits erfolgten Belastung ermittelten Fließkurve bestimmt, bezeichnet man sie als dynamische Fließgrenze [170, 175, 182]. Da das Fließen des Materials zu diesem Zeitpunkt meist noch nicht beendet ist, fällt die dynamische Fließgrenze oftmals um ein Vielfaches kleiner aus als die statische, an einem ungestörten Material ermittelte, Fließgrenze [180]. Tritt der seltene Fall auf, dass bei steigender Scherbeanspruchung die Viskosität eines Stoffes zunimmt und bei Entlastung wieder auf einen Ausgangswert zurückfällt, wird dies als rheopexes Fließverhalten eines Stoffes bezeichnet [100].

2.4.4 Konsistenz und beeinflussende Faktoren

Zementleim ist im allgemeinen Verständnis eine Suspension von in Wasser gleichmäßig dispergierten Zementpartikeln. Das Fließverhalten von frischen Zementsuspensionen ist zweifelsfrei viskoelastischer Natur. Ihr komplexes Verformungsverhalten weist zudem zeit- und belastungsabhängige Strukturveränderungen auf und ist somit nicht-linear [183–185]. Diese nicht-lineare Viskoelastizität⁷⁰ liegt neben der Größenverteilung der Zementkörner⁷¹ und deren volumenbezogenen Feststoffgehalt, in den chemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Feststoffpartikeln der Suspension begründet, die zu einer netzartigen, bis zu einem gewissen Grad widerstandsfähigen Struktur führen [175, 185]. Dies schlägt sich in einer messbaren Fließgrenze⁷² nieder.

Die Konsistenz von unter Normbedingungen hergestelltem Zementleim kann sich abhängig vom Wasserzementwert⁷³ von „krümelig“ ($w/z < 0,2$) über „erdfeucht“ ($w/z \approx 0,2$), „pastös/steifplastisch“ ($0,2 < w/z < 0,3$), „zähflüssig“ ($0,3 < w/z < 0,4$) bis zu „dünnflüssiger“ ($0,4 < w/z < 1$) sowie „wässriger“ ($w/z > 1$) Beschaffenheit bewegen (Tab. 3). Dabei wird typischerweise ohne Einsatz von Fließmitteln, abhängig von der spezifischen Oberfläche des Bindemittels, ein physikalisch bedingter Mindestwasseranspruch⁷⁴ von ca. 25 % bis 30 % des Zementgesichts angenommen [133, 190]. Generell steigt die Viskosität und erhöht sich die Fließgrenze von Zementleim mit sinkendem Wasserzementwert, also steigendem Feststoffgehalt. Die Agglomerationsneigung von Zement hat Einfluss auf alle rheologischen Parameter, insbesondere auf das belastungs- sowie zeitabhängige Fließverhalten. Entsprechend kann die Fließfähigkeit durch in Agglomeraten gebundenes Wasser und durch Verflockung herabgesetzt werden, was auf dilatantes Verhalten weist. Gegenläufig dazu wirkt die damit einhergehende Verringerung der spezifischen Oberfläche verflüssigend. Zudem kommt es abhängig von der Mahlfineinheit des Zements durch verlängertes Mischen sowie höherer Mischenergie bzw. größere Scherbelastungen⁷⁵ infolge des Aufbrechens von Agglomeraten zu einem erhöhten Wasseranspruch und bezogen

70 Die (plastische) Viskosität von Frischbeton ist nach DIN EN 206 der Fließwiderstand nach Beginn des Fließens [25, 186]. Sie kann nur indirekt bestimmt werden und ist u. a. von der genutzten Messmethode abhängig [126].

71 In etwa zwischen $0,1 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$ [133]

72 Unberücksichtigt bleiben hier die viskoelastischen Reaktionen von Zementsuspensionen bei geringen Spannungen unterhalb der Fließgrenze, die dazu führten, dass die Existenz der Fließgrenze bereits vollständig bezweifelt und auf nur ungenaue Messmethoden zurückgeführt wurde [187, 188]. Es ist umstritten, ob es sich bei der Fließgrenze nicht um eine zeitabhängige Eigenschaft handelt, da die Beobachtungsspanne immer an den betrachteten Stoff angepasst sein sollte [179, 189].

73 Das Wasser bestimmt je nach Menge den Abstand zwischen den Zementpartikeln.

74 Erforderliche Wassermenge zur Benetzung der Partikeloberflächen sowie zum Füllen der Partikelzwischenräume [133].

75 Etwa durch den Einsatz von kolloidaler Mischtechnik (Kap. 4.2.5.1).

auf Tabelle 3 zu dann geänderten Konsistenzen. Dies deutet auf das strukturviskose Fließverhalten von Zementleim hin [175, 185, 191, 192].

Aufgrund der fortschreitenden Hydratation ist das Fließverhalten von Zementleim ständiger Änderung unterworfen [193]. Die Strukturbildung erfolgt bereits in der frühen Ruhephase (Kap. 2.3.1.1.1 b). Daher müssen rheologische Messungen entsprechend frühzeitig und vor allem zum jeweils gleichen Zeitpunkt im Verfahrensablauf durchgeführt werden (Kap. 4.3.2.2). Nach GREIM & TEUBERT (2001) weist der Verlauf des Widerstandsmomentes bei gleichbleibender Scherbelastung über die Zeit hydratationsbedingt auf eine sich abschwächendes thixotropes bzw. sich verstärkendes rheopexes Fließverhalten hin [177].

Tab. 3: Konsistenz von Zementleim abhängig vom Wasserzementwert [133].

Konsistenz	Wasserzementwert
krümelig	$w/z < 0,2$
erdfeucht	$w/z \approx 0,2$
pastös/steifplastisch	$0,2 < w/z < 0,3$
zähflüssig	$0,3 < w/z < 0,4$
dünnflüssig	$0,4 < w/z < 1$
wässrig	$1 < w/z$

2.4.5 Zwei-Platten-Modell

Die grundlegenden rheologischen Kennwerte (Kap. 2.4.1) können im Zwei-Platten-Modell beschrieben werden. Eine Platte mit bekannter Scherfläche A wird durch eine definierte Scherkraft F mit einer daraus resultierenden Geschwindigkeit v parallel zu einer unbeweglichen Platte bewegt. Zwischen den beiden Platten wird dadurch die dort im Scherspalt mit der Höhe h befindliche Flüssigkeit geschert (Abb. 21). Die exakte Berechnung der rheologischen Parameter ist nur unter folgenden Randbedingungen möglich [100, 171, 176]:

- Die zu scherende Substanz hat an beiden Platten Wandhaftung, d. h., sie darf weder rutschen noch gleiten.
- Im Scherspalt herrschen laminare⁷⁶ Fließbedingungen in Form von Schichtenströmung⁷⁷ (Abb. 19).

⁷⁶ Strömung ohne Turbulenzen, bei der keine nennenswerte Querdurchmischung in der Flüssigkeit stattfindet [170].

⁷⁷ Verschiebung dünnster Flüssigkeitsschichten.

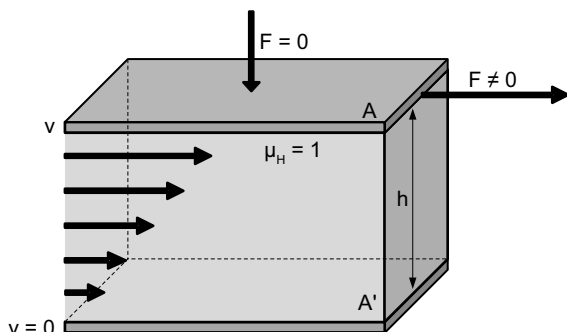


Abb. 21: Zwei-Platten-Modell zur Beschreibung der rheologischen Messgrößen, nach [100, 194].

2.4.6 Rotationsrheometrie

Für die hier relevanten phänomenologischen Messungen rheologischer Materialparameter wird versucht das Zwei-Platten-Modell, unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen, in unterschiedliche Weise auf Rheometer zu übertragen. Dabei wird das Fließ- und Deformationsverhalten von Flüssigkeiten über die Messung des mechanischen Widerstandes, der Verformung und der Verformungsgeschwindigkeit ermittelt.

Die Messergebnisse werden in Form von Fließkurven als Relation aus der Schubspannung τ und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ aufgetragen (Abb. 20, S. 43). Daneben erfolgt die Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Viskosität η und der Scherrate $\dot{\gamma}$ in Form von Viskositätskurven. Um diese zu erstellen, wird für jeden Punkt einer Fließkurve ein Wert für die Viskosität ermittelt (Gleichung 2.17, S. 41) [176].

Bei einem, wie im vorliegenden Fall verwendeten, Rotationsrheometer wird in einem definiert breiten Scherspalt zwischen drehendem Rotor und unbewegtem Becher in der Testflüssigkeit eine Scherspannung aufgebracht und so eine laminare Strömung hergestellt (Abb. 22). Abhängig von der Messgeometrie können, über die bereits aufgezeigten rechnerischen Wege (Kap. 2.4.1), Zusammenhänge auf Grundlage der vorgegebenen Drehzahl und der Messgröße Drehmoment, ausgehend von der Scherrate Rückschlüsse auf Scherspannung und Viskosität hergestellt werden.

Abhängig von der Dauer und Größe der aufgebrachten Spannung wird ein Strukturbruch unterschiedlicher Intensität in der Messflüssigkeit erzeugt. Dies lässt u. a. Rückschlüsse auf die Dispergierungsverhalten und -qualität zu [185].

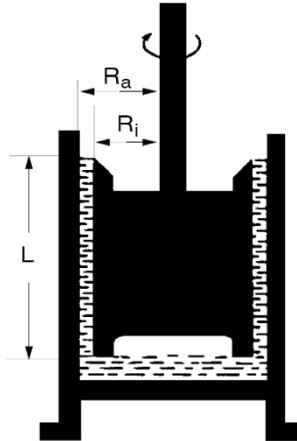


Abb. 22: Schematische Darstellung von Rotor und gefülltem Messbecher des verwendeten Viskosimeters ($R_a = 21$ mm, $R_i = 20,04$ mm, $L = 60$ mm) [195].

a) Bestimmung der Fließgrenze

Da das Fließverhalten von Zementleimen bei geringen Scherbelastungen mithilfe der hier angewandten Technik nur unzureichend abgebildet wird, müssen in diesem Bereich für den Verlauf der Fließkurve Annahmen getroffen werden. So kann die, u. a. von der aufgetragenen Scherbelastung abhängige, Fließgrenze durch eine Anpassungsfunktion etwa nach Herschel/Bulkley oder Bingham vereinfachend auf einen Einzelwert reduziert werden (Abb. 20) [100, 175, 185]. Die ermittelten Werte sind je nach ausgewähltem Modell verschieden. Nach Bingham wird die Fließkurve auf die Scherrate $\dot{\gamma} = 0$ extrapoliert (Formel 2.20 und 2.21). Der Schnittpunkt der Regressionskurve mit der Ordinate wird als die Fließgrenze des untersuchten Materials gewertet⁷⁸ [100, 196].

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad (2.20)$$

$$\eta = \frac{\tau - \tau_B}{\dot{\gamma}} \quad (2.21)$$

- τ : Schubspannung.
- τ_B : Fließgrenze nach Bingham.
- η_B : Fließkoeffizient nach Bingham.
- $\dot{\gamma}$: Scherrate (Steuergröße).

Die Anpassungsfunktion nach Herschel/Bulkley (Formel 2.22) kann bei nichtlinearem Verlauf von Fließkurven Anwendung finden. Sie ist jedoch nicht dimensionsrein oder physikalisch hinterlegt, die benötigten Konstanten können über-

⁷⁸ Diese Methode überschätzt tendenziell den unterstellten tatsächlichen Wert [175, 185].

schlägig oder empirisch ermittelt werden. Aus diesem Grund wird von dessen Nutzung vielfach abgeraten [100, 185].

$$\tau = \tau_{HB} + C \cdot \dot{\gamma}^p \quad (2.22)$$

- τ : Schubspannung.
 τ_{HB} : Fließgrenze nach Herschel/Bulkley.
 C : Fließkoeffizient nach Herschel/Bulkley.
 $\dot{\gamma}$: Scherrate.
 p : Herschel/Bulkley-Index (Fließverhalten: $p < 1$, scherverdünnend; $p > 1$, scherverdickend; $p = 1$, "Bingham-Verhalten").

Daneben ist es auch möglich in Versuchen mit dem Haegermann-Trichter die Fließgrenze zu errechnen [186, 197].

b) Bewertung der Viskosität

Es ist üblich, Fließkurven von Zementleimen zur Herstellung einer Vergleichbarkeit mit Kontinuumsmodellen über Regressionsfunktionen anzunähern. In Bereichen mit höheren Scherraten liegen hierzu meist ausreichend Daten vor. Im Bereich geringer Scherraten hingegen werden zur Beschreibung viskoelastischer Eigenschaften Annahmen getroffen, etwa hingehend einer konstanten Fließgrenze, einer konstanten Grenzviskosität oder auch einer sogenannten Null-Viskosität. Diese Modelle vernachlässigen jedoch die elastischen Anteile, die insbesondere bei geringen Schergeschwindigkeiten dominierend sind. Ihre Genauigkeit nimmt daher bei höheren Feststoffgehalten und niedrigen Scherraten ab. Im Falle von Modellen, die von einer Null-Viskosität als Randbedingung ausgehen (CROSS [198], Formel 2.23), können zwar auch geringer werdende Scherbelastungen über eine starke Zunahme der dynamischen Viskosität abgebildet werden, jedoch nicht das, für Zementleim typische Verhalten einer elastischen Rückverformung bei Entlastung [181, 185, 199].

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (K \cdot \dot{\gamma})^p} \quad (2.23)$$

- $\dot{\gamma}$: Scherrate.
 η_∞ : Unendlich-Viskosität, obere Randbedingung nach Cross.
 η_0 : Null-Viskosität, untere Randbedingung nach Cross.
 K : „Cross-Konstante“.
 p : „Cross-Hochzahl“

c) Bewertung der Strukturviskosität und Thixotropie

Durch die Scherung von Zementleimen werden die durch van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen bewirkten Bindungen zwischen Molekülverbänden aufgebrochen und somit das Fließverhalten verändert. Diese Veränderungen sind zeit- und scherratenabhängig und bedingt reversibel; die aufgebrochenen Bindungen bilden sich in einer Ruhephase wieder neu [173]. Die Thixotropie insbesondere von Dispersionen lässt sich mit geschlossen Ansätzen für

betontechnologische Anwendungen nur unzureichend beschreiben. Daher wird im vorliegenden Zusammenhang der Beschreibung des zeit- und belastungsabhängigen Fließverhaltens über die Ermittlung von Absolutwerten der Vorzug gegeben. Zum einen kann die, sich aus einer linearen Zu- und Abnahme der Scherbelastung ergebenden, Hysterese fläche ausgewertet werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, Viskositätswerte nach definierten Ruhe- bzw. Belastungsphasen zueinander ins Verhältnis zu setzen (Kap. 4.3.2.2.1 e, S. 79) [100, 173].

Stabilität von ultraleichten Schaumbetonen
Betrachtung instationärer Porenstrukturen

Albrecht, G.-B.

2016, XIII, 234 S. 137 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-16595-6